

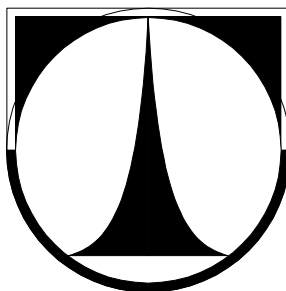


TU v Liberci
Katedra materiálů

Diplomová práce
Bc. Barbora Subotová

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní



Vliv Cu, Si v litině na hodnoty modulu pružnosti

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Bc. Barbora Subotová

2008



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program N 2301 – Strojní inženýrství

Strojírenská technologie
zaměření materiálové inženýrství

Katedra materiálů

Vliv Cu, Si v litině na hodnoty modulu pružnosti

Influence of copper, silicium on value of modulus of elasticity in cast iron

Bc. Barbora Subotová

KMT – 243

Vedoucí diplomové práce: doc. Břetislav Skrbek.– *TU v Liberci*

Konzultant diplomové práce:

Rozsah práce a příloh:

Počet stran	59
Počet tabulek	14
Počet příloh	12
Počet obrázků	26

23.5. 2008



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra materiálů

Studijní program: N 2301 Strojní inženýrství

Diplomant: Bc. Barbora Subotová

Téma práce: Vliv Cu, Si v litině na hodnoty modulu pružnosti

Influence of copper, silicium on value of modulus of elasticity in cast iron

Číslo DP: KMT – 243

Vedoucí DP: doc. Břetislav Skrbek – *TU v Liberci*

Konzultant:

Abstrakt:

Diplomová práce se zabývá studiem vlivu mědi a křemíků na hodnoty tuhosti v litinách. Poznatky o modulu pružnosti byly získány z mechanických zkoušek a z nedestruktivní zkoušky ultrazvukem.

Abstract:

This thesis investigates the influence of copper and silicium on value of modulus of elasticity in cast iron. A piece of knowledge about modulus of elasticity comes by mechanical tests and from non-destructive control method.



Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 23. května 2008

.....

Bc. Barbora Subotová
Holany 51
470 02 Česká Lípa



P o d ě k o v á n í

Děkuji všem, kteří svou radou či pomocí přispěli ke vzniku této práce. Zejména panu doc. Skrbkovi za praktické rady a připomínky a ing. Dočkalovi a ing. Šmrhovi za poskytnuté vzorky a cenné rady. Dále bych chtěla poděkovat celé katedře materiálů za odbornou přípravu do života.

Největší dík patří rodině a mému příteli za podporu během celého studia.



Obsah

1. ÚVOD	9
2. TEORETICKÁ ČÁST	9
2.1 Litiny	9
2.1.1 Bílé litiny	10
2.1.2 Grafitické litiny	10
2.1.2.1 Litina s lupínkovým grafitem	11
2.1.2.2 Litina s kuličkovým grafitem	14
2.1.2.3 Litina s červíkovým grafitem	17
2.2 Vliv legujících prvků na mechanické a fyzikální vlastnosti litin a ocelí	18
2.2.1 Vliv legujících prvků na mechanické a fyzikální vlastnosti LLG	19
2.2.2 Vliv legujících prvků na mechanické a fyzikální vlastnosti LKG	20
2.3 Základní mechanické zkoušky	21
2.3.1 Zkouška tahem	22
2.3.2 Zkoušky tvrdosti	26
2.3.3 Nedestruktivní zkoušení materiálu	27
2.3.3.1 Vířivoproudé zkoušení	28
2.3.3.1.1 Princip vířivoproudého zkoušení	29
2.3.3.1.2 Výhody a nevýhody metody vířivých proudů	30
2.3.3.1.3 Použití metody vířivých proudů	31
2.3.3.2 Ultrazvukové zkoušení	32
2.3.3.2.1 Ultrazvukové vlny	32
2.3.3.2.2 Zdroje ultrazvuku	34
2.3.3.2.3 Princip	35
2.3.3.2.4 Přehled metod	36
2.3.3.2.5 Přehled měřených parametrů	37
2.3.3.2.6 Přístroje a použití	38
3. PRAKTICKÁ ČÁST	40
3.1 Použité vzorky	40
3.2 Chemické složení vzorků	41
3.2.1 Litina s lupínkovým grafitem s různým obsahem Cu	41
3.2.2 Litina s kuličkovým a červíkovým grafitem s různým obsahem Cu	41
3.2.3 Litina s kuličkovým grafitem s různým obsahem Si	42



3.3 Mechanické hodnoty	43
3.3.1 Mechanické hodnoty LLG s různým obsahem Cu	43
3.3.2 Mechanické hodnoty LKG a LČG s různým obsahem Cu	44
3.3.3 Mechanické hodnoty LKG s různým obsahem Si	45
3.4 Hodnoty naměřené ultrazvukem	46
3.4.1 Rovnice pro výpočet E_0	46
3.4.2 Hodnoty naměřené ultrazvukem u LLG	48
3.4.3 Hodnoty naměřené ultrazvukem u LKG a LČG	51
3.4.4 Hodnoty naměřené ultrazvukem u LKG	53
4. DISKUZE	54
5. ZÁVĚR	56
6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	58



Seznam použitých zkratk a symbolů

A	- tažnost [%]
ADI	- izotermicky kalená LKG
E	- Youngův modul pružnosti [MPa, GPa]
E_0	- počáteční modul pružnosti [MPa]
Fe_3C	- cementit
Fe_3P	- fosfid železa
G	- modul pružnosti ve smyku [MPa]
H	- intenzita magnetického pole [$A \cdot m^{-1}$]
HB	- tvrdost dle Brinella
KVZ	- kovy vzácných zemin
LČG	- litina s červíkovým grafitem
GJV	- litina s červíkovým grafitem – evropské označení
LKG	- litina s kuličkovým grafitem
GJS	- litina s kuličkovým grafitem – evropské označení
LLG	- litina s lupínkovým grafitem
GJL	- litina s lupínkovým grafitem – evropské označení
μ	- Poissonovo číslo [-]
ρ	- hustota, měrná hmotnost [$g \cdot cm^{-3}$]
NDT	- nedestruktivní testování
R_e	- mez kluzu v tahu [MPa]
R_m	- mez pevnosti v tahu [MPa]
$R_{p0,2}$	- smluvní mez kluzu v tahu [MPa]
S_C	- stupeň eutektičnosti [1]
ρ	- hustota, měrná hmotnost [$kg \cdot m^{-3}$, $g \cdot cm^{-3}$]
σ_{Kt}	- mez kluzu v tahu [MPa]
σ_{Pt}	- mez pevnosti v tahu [MPa]
Z	- zúžení (kontrakce) [%]



1. Úvod

Rozvoj výroby je často limitován materiálem a jeho zpracováním. V dnešní době je vývoj nových materiálů a inovace stávajících materiálů na vzestupu. Dominantní postavení má automobilový průmysl, který je jedním z hlavních aktivátorů tohoto všeobecného rozvoje materiálů. Ani litiny nejsou výjimkou, a v současné době se jejich objem opět zvyšuje. Rostou nároky na kvalitu odlitků, jejich mechanické vlastnosti, ale i vzhled. Tyto vlastnosti samozřejmě ovlivňuje mnoho faktorů. Mezi nejdůležitější činitele patří legující prvky, které ovlivňují mechanické a fyzikální vlastnosti, ale například i strukturu odlitku. Mezi důležité parametry litin patří i modul pružnosti v tahu, který závisí na vlastnostech materiálu. Tato práce se zabývá vlivem odstupňovaných obsahů Cu nebo Si na modul pružnosti v tahu. Počáteční modul pružnosti E_0 byl vypočítán z hodnot naměřených ultrazvukem. Používá se k třídění odlitků do jakostních skupin. Počáteční modul pružnosti je měřen při mechanickém napětí, které je přibližně rovno nule. Při měření modulu pružnosti - už ne však počátečního - z klasické zkoušky tahem je to směrnice přímky tj., $\tan \alpha$. Cílem této práce bylo zhodnotit vliv Cu případně Si na tuhost (rychlost zvuku) litin.

2. Teoretická část

2.1 Litiny

Jako litiny bývají označovány slitiny železa se zvýšeným obsahem uhlíku nad 2,1 % a dalších prvků zejména křemíku. Křemík podporuje tuhnutí litin podle stabilního diagramu Fe-C. Litiny se vyrábějí tavením surovin (surové železo, litinový nebo ocelový šrot atd.) – v pecích. Na rozdíl od ocelí se litiny zpracovávají výhradně odléváním, neboť mají výbornou slévateľnost a lze z nich odlévat tvarově velmi náročné odlitky. Z litin se odlévají např. bloky spalovacích motorů, pístní kroužky, vložky válců a další.

Podle toho, v jaké formě je přítomen uhlík, se litiny dělí na dvě skupiny:

- bílé litiny
- grafitické litiny [1]



2.1.1 Bílé litiny

U bílé litiny je veškerý uhlík přítomen ve formě cementitu (Fe_3C). Název „bílá“ vznikl z charakteristického bílého zbarvení lomové plochy litiny. Tuhnutí i přeměny v tuhém stavu u bílé litiny probíhají podle metastabilního diagramu $\text{Fe} - \text{Fe}_3\text{C}$. Produktem eutektické přeměny je ledeburit (eutektikum $\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$). Bílé litiny obsahují cca 2,4 – 4,5 % C. Vznik cementitu v litinách podporuje vyšší ochlazovací rychlost při tuhnutí, přítomnost karbidotvorných prvků, zejména mangan (0,4 – 1%) a nižší obsah křemíku (0,3 – 1,6%). Vzhledem k vysokému obsahu tvrdého karbidu železa Fe_3C jsou bílé litiny velmi tvrdé, křehké a prakticky neobrobitelné. Používají se na součástky extrémně namáhané třením, jako jsou čelisti drtičů nebo koule v kulových mlýnech. Jejich hlavní využití je však jako výchozí materiál pro výrobu tzv. temperované litiny.

2.1.2 Grafitické litiny

Grafitické litiny jsou mnohem významnější než bílé litiny. V těchto litinách probíhá tuhnutí podle stabilního diagramu $\text{Fe}-\text{C}$. Znamená to, že při eutektické reakci vzniká austenit a grafit, tzv. grafitické eutektikum ($\gamma + \text{C}$). Vznik grafitu při tuhnutí litiny podporuje vyšší obsah křemíku, nižší obsahy karbidotvorných prvků a nižší ochlazovací rychlost. Další přeměny austenitu v tuhém stavu mohou probíhat jak podle stabilního tak podle metastabilního diagramu. V prvním případě se austenit rozpadá eutektoidní reakcí na směs feritu a grafitu (tzv. grafitický eutektoid). Grafit vzniklý touto reakcí se naváže na již existující částice eutektického grafitu a výsledkem je litina s čistě feritickou maticí. Ve druhém případě vznikne při eutektoidní reakci perlit a grafitická litina bude mít perlitickou maticí. Velmi často se u grafitických litin vyskytují obě složky a tyto litiny tedy mají feriticko-perlitickou maticí. To, jak budou probíhat přeměny austenitu v tuhém stavu, závisí na aktuálním chemickém složení slitiny a ochlazovací rychlosti.

V grafitických litinách mohou mít částice eutektického grafitu různý tvar v závislosti na chemickém složení a podmínkách výroby. Podle tvaru grafitu pak rozlišujeme litinu s lupínkovým grafitem, s kuličkovým grafitem a litinu s vermikulárním (červíkovitým) grafitem. Posledním typem je litina



s vločkovým grafitem (temperovaná), u níž však grafit nevzniká při tuhnutí, nýbrž tepelným rozkladem cementitu v bílé litině. [1]

2.1.2.1 Litina s lupínkovým grafitem

Lupínkový (lamelární) grafit je základním morfologickým typem grafitu. Litina s lupínkovým grafitem, neboli šedá litina, je nejstarším a nejběžnějším typem grafitické litiny. Obvyklé složení LLG (litina s lupínkovým grafitem) bývá: 2,8 – 3,6 %C, 1,4 – 2,8 % Si, 0,5 – 1 % Mn, 0,2 – 0,5 % P, max. 0,15 % S.

Litina s lupínkovým grafitem je velmi levný materiál, nenáročný na chemické složení s výbornou slévateľností a kluznými vlastnostmi. Nevýhodou je poměrně nízká pevnost – max. 400 MPa a tažnost méně než 1 %. [1, 2]

Mechanické vlastnosti litin s lupínkovým grafitem (LLG) jsou ovlivněny tvarem, velikostí a množstvím grafitu. Kromě těchto faktorů ovlivňují konečnou podobu matrice především chemické složení a rychlost ochlazování.

Pokud je matrice litiny feritická, litina má nejnížší pevnost a tvrdost. Feritická matrice vzniká při nízké ochlazovací rychlosti a při zvýšeném množství křemíku. Ve většině případů je však vyžadována vyšší pevnost a tvrdost a toho lze dosáhnout, pokud je matrice perlitická. Perlitická matrice vzniká při vyšší ochlazovací rychlosti a podporují ji rovněž malá množství prvků jako jsou Cu, Cr, Mo, Sn. Vedle grafitu a perlitu (případně feritu) bývá v mikrostruktuře šedých litin přítomna ještě jedna složka - tzv. steadit, což je eutektikum bohaté na fosfor.

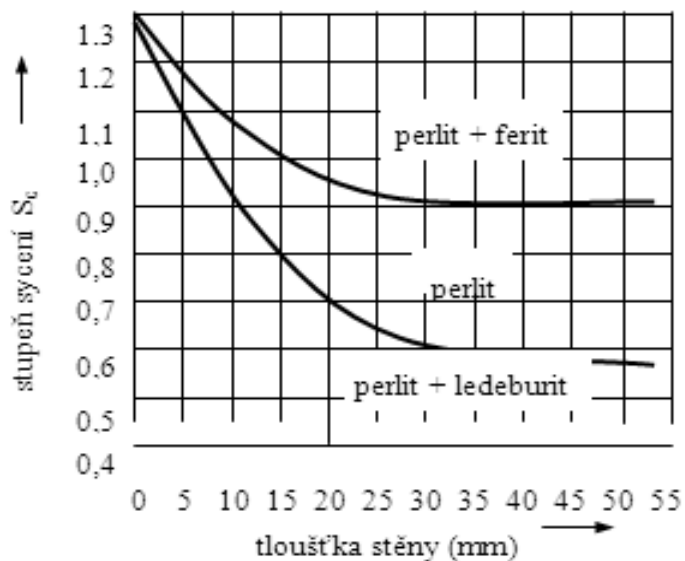
Polohu eutektického bodu v litinách neovlivňuje pouze uhlík, nýbrž také další prvky a to zejména křemík a fosfor. Pro posouzení společného vlivu C, Si a P na strukturu LLG a na jejich mechanické vlastnosti se proto zavádí tzv. stupeň eutektičnosti S_C :

$$S_C = \frac{\%C}{4,26 - 0,31\%Si - 0,27\%P - 0,04\%S - 0,074\%Cu + 0,063\%Cr + 0,027\%Mn} \quad (1)$$

Ve vztahu S_C označují symboly prvků jejich množství v litině v hm.%. Stupeň eutektičnosti ukazuje, zda daná slitina je:

- podeutektická $S_C < 1$
- eutektická $S_C = 1$
- nadeutektická $S_C > 1$

Jestliže má slitina nadeutektické složení, obsahuje velké částice primárního grafitu, které nejsou příliš žádoucí. Vliv stupně eutektičnosti a zároveň rychlosti ochlazování na strukturu matrice litiny ukazuje Sippův diagram (obr. 2 - 1). [1, 2]



Obr. 2-1.: Vliv stupně eutektičnosti a rychlosti ochlazování odlitku na strukturu LLG [2]

Dle tohoto diagramu se doporučuje stupeň eutektičnosti $S_C = 0,85 - 0,95$, kdy vzniká nejvýhodnější perlitická struktura. Stupeň eutektičnosti může pomoci také při orientačním odhadu mechanických vlastností litiny. S rostoucím stupněm eutektičnosti klesá pevnost i tvrdost slitin.

Díky tvaru grafitu má LLG nejhorší plastické vlastnosti – nemá téměř žádnou tažnost, což je způsobeno koncentrací napětí na ostrých hranách lupínků. Neplatí zde Hookův zákon. Deformace je nelineární. Při růstu napětí klesá modul pružnosti, což je dáno mechanismem porušení.

Pozitivně se lupínky projevují ve struktuře zvýšením schopnosti útlumu a tím snížení citlivosti na účinek vrubů. Dalším pozitivem je vynikající zabíhavost s relativně malým sklonem ke smršťování a lepší tepelnou vodivost než oceli. Pevnost litiny se zvyšuje, čím četnější a menší je grafit. [2]



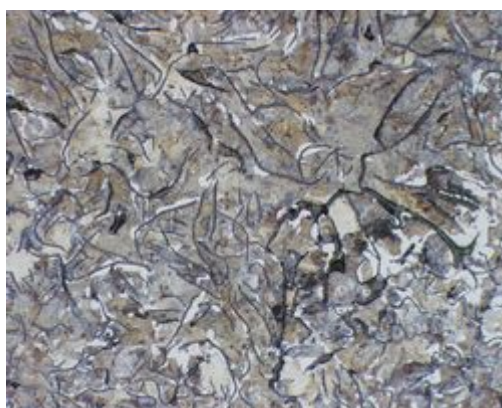
Grafitické částice v litinách lze zjemňovat očkováním. Očkování je obecně technologická operace, při které se do tekutého kovu vnáší malé množství vhodně zvoleného očkovačného, a tím se zvýší množství krystalizačních zárodků určité fáze. Grafitizační očkování LLG umožňuje zvýšit počet krystalizačních zárodků grafitu. Jako očkovač se využívá např. slitina FeSi75. Ferosilicium FeSi75 je slitina Fe se 75% Si a patří mezi nejčastěji používaná očkovačného z důvodu jeho ceny a dostupnosti. Mezi další očkovačného patří např. Simancal, Foundrysil 75, Superseed 75 a další. Jejich složení a další příklady jsou zpracovány v tabulce č. 2 - 1. [1, 2]

Tabulka č. 2 – 1: Příklady očkovačného přísad a jejich složení. [2]

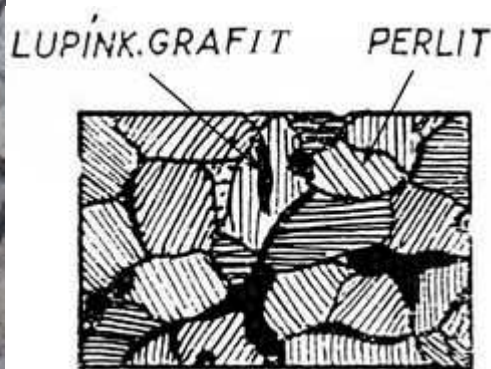
Očkovačného	Obsah základních prvků, % (zbytek je Fe)
FeSi75	Min. 68 Si, max. 0,5 Mn, max. 1,7 Al, max. 0,4 Cr
SIMANCAL	Si 70-75, Mn 2-4, Ca 0,8-2, Al 1-2
Foundry-Grade 75	Si 75±2, Al max. 1,25, Ca 0,8±0,2
Foundrysil 75	Si 75±2, Al max. 1,25, Ca 1,0±0,25, Ba 1,0±0,25
Superseed 75	Si 75±2, Al max. 0,5, Ca max. 0,1, Sr 0,8±0,2
Zirconic	Si 75±2, Al 1,25±0,25, Ca 2,25±0,25, Zr 1,55±0,25
Inogen 75	Si cca 75, Al+Ca cca 2,5
Inoculoy 63	Si 60-65, Mn 7-12, Ca 1,5-3, Ba 4-6, Al 1-1,5
Optinoc Z	Si 73-78, Zr 1,2-2,0, Ca 1,5-3,5, Al 1,2-2,2
SB 5	Si 64-70, Ba cca 2, Al cca 1,5, Ca cca 1
Inoculin	Si cca 65, Zr cca 5, Ca cca 1,3, Mn cca 3,5, Al cca 1,3



Obr. 2 – 2.: Litina s lupínkovým grafitem s matricí feritickou



Obr. 2 – 3.: Litina s lupínkovým grafitem s matricí feriticko-perlitickou



Obr. 2 – 4.: Litina s lupínkovým grafitem s matricí perlitickou

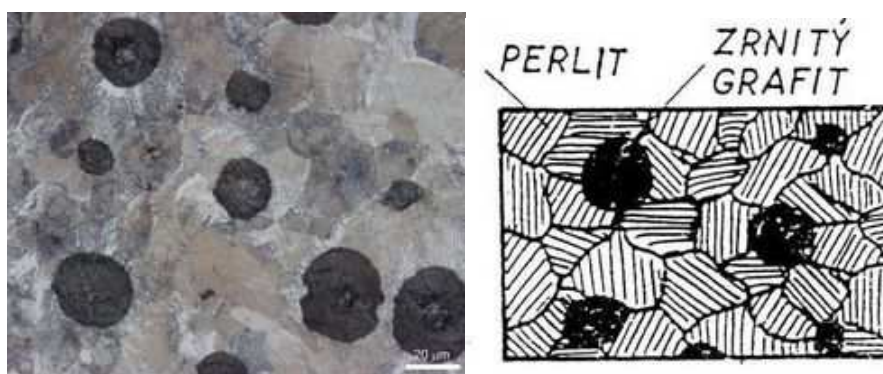
2.1.2.2 Litina s kuličkovým grafitem

U této slitiny se grafit vylučuje ve formě kuliček. K tvorbě kuličkového grafitu nestačí jen Fe, C a Si, ale je třeba tavenině dodat skupinu prvků, která inicializuje růst zárodku do požadovaného tvaru. Tato operace se nazývá modifikace. Nejběžnější modifikátor je hořčík (0,03 – 0,08%) a podobný účinek mají též prvky vzácných zemin – např. Ce. Hořčík však zvyšuje

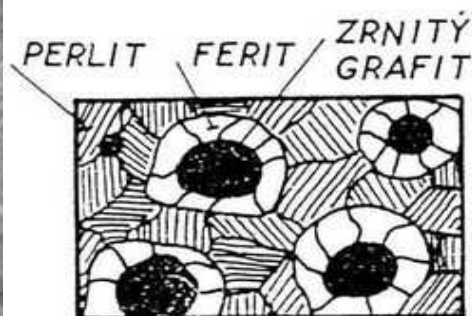
stabilitu karbidů, proto je nutné po modifikaci grafitizačně očkovat. Existuje několik metod jak litinu modifikovat. Například přidáním Mg a jeho slitin do tekutého kovu metodou přelivací v otevřené pánvi, ponornou metodou, různými průtokovými metodami apod. Pokud je modifikátoru nedostatečné množství, změna morfologie proběhne jen částečně a vznikne tzv. červíkovitý grafit. Dále, při velmi pomalé ochlazovací rychlosti, může vzniknout ještě rozpadnutý, explodovaný grafit. Ve velkých odlitcích zase dochází k segregaci prvků, které podporují tvorbu lupínkového grafitu, do naposledy tuhoucích míst, ve kterých se koncentrují a způsobují, že se zde, na hranicích eutektických buněk, vyloučí lupínkový mezibuňkový grafit. Takzvaný Chunky grafit se tvoří uvnitř buněk, přičemž buňkové hranice mohou obsahovat i kuličkový grafit. Proces vzniku tohoto grafitu ovlivňuje kombinace různých faktorů a nejčastěji k němu dochází při nízkých ochlazovacích rychlostech a při velké tloušťce stěny odlitku. Chemické složení litin s kuličkovým grafitem bývá následující: 3,2 – 4 % C, 1,8 – 3 % Si, 0,1 – 0,8 % Mn, max. 0,1 % P, max. 0,05 % S, a 0,03 – 0,08 % Mg. [2]

Tvárná litina je celkově náročnější na čistotu taveniny než je tomu u LLG, proto je materiálem dražším. Její vyšší cena je však vyvážena mnohem lepšími mechanickými vlastnostmi - pevností až 900 MPa a tažností až 20%. Je to dáno lepší morfologií grafitu s nižším vrubovým účinkem. Matrice tvárných litin může být feritická i perlitická. Feritická má nižší pevnost a vyšší tažnost, perlitická naopak, vyšší pevnost a nižší tažnost. Tvárné litiny se mechanickými vlastnostmi blíží některým ocelím a vzhledem k příhodnější ceně je v řadě případů nahrazují. [1]

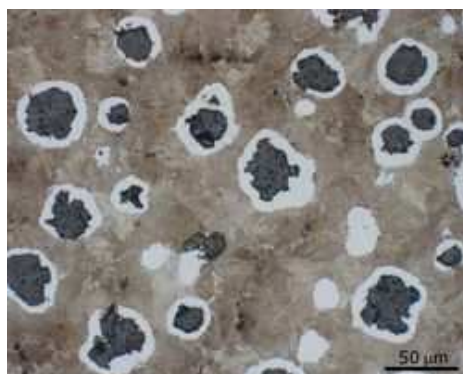
Struktury litin s kuličkovým grafitem [2]



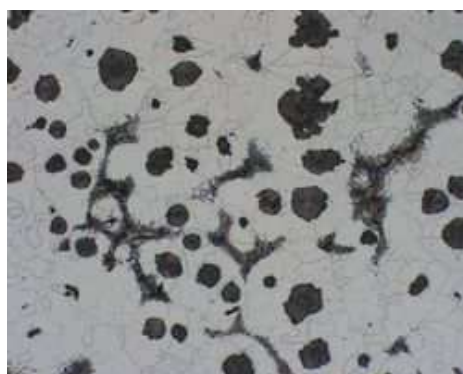
Obr. 2 – 5.: Litina s kuličkovým grafitem s matricí perlitickou



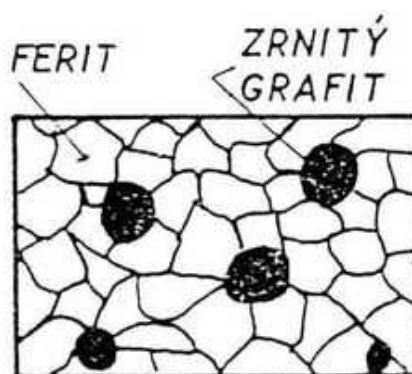
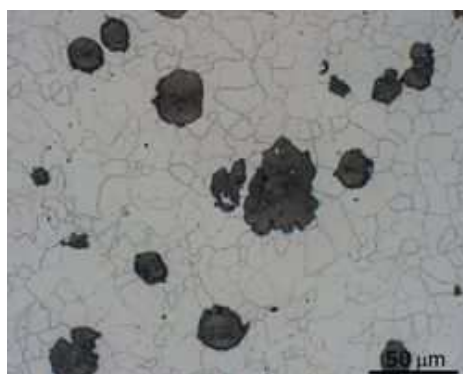
Obr. 2 – 6.: Litina s lupínkovým grafitem s matricí feriticko-perlitickou, s min. množstvím feritu



Obr. 2 – 7.: Litina s lupínkovým grafitem s matricí feriticko-perlitickou



Obr. 2 – 8.: Litina s lupínkovým grafitem s matricí feriticko-perlitickou, s min. zrnitého perlitu



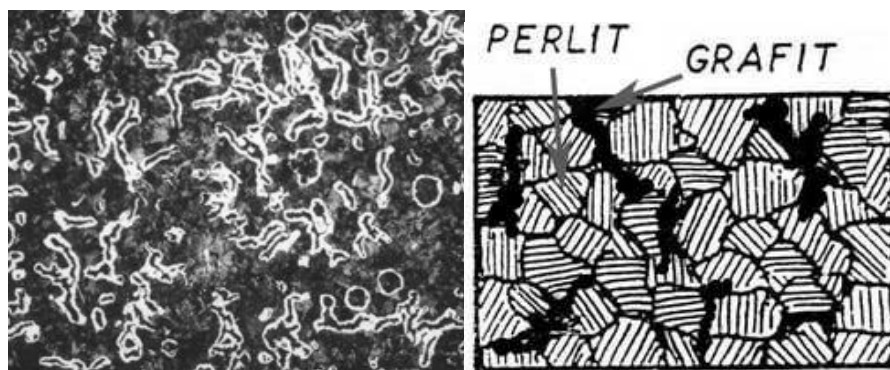
Obr. 2 – 9.: Litina s kuličkovým grafitem s matricí feritickou

2.1.2.3 Litina s červíkovým grafitem

Tato litina má ve struktuře zvláštní tvar grafitu podobný formě jako je v LLG. Náhodně orientované grafitické částčky jsou ale kratší, silnější a mají zaoblené konce. Někdy obsahuje i trochu nedokonale zrnitého grafitu. Matrice bývá perlitická, feritická či jejich kombinace.

Chemické složení se pohybuje okolo 3,2 - 4,2 %C, 1,5 – 4 %Si, 0,4 – 0,8 % Mn, pod 0,1 % P, pod 0,02 % S. Litina není v ČR normována. [2]

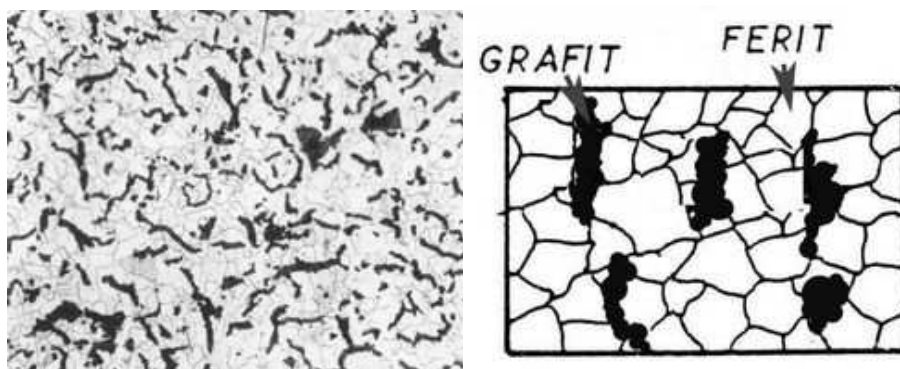
Struktury litin s červíkovitým (vermikulárním) grafitem [2]



Obr. 2 – 10.: Litina s vermikulárním grafitem s matricí perlitickou



Obr. 2 – 11.: Litina s vermikulárním grafitem s matricí feriticko-perlitickou



Obr. 2 – 12.: Litina s vermikulárním grafitem s matricí feritickou



Vermikulární litina se často vyrábí záměrně v poměru min. 80% červíkovitého grafitu a max. 20% nedokonale nebo pravidelně zrnitého grafitu. Způsob její výroby je dán modifikací, která způsobí neúplnou sferoidizaci grafitu. Modifikace je podobná jako u LKG, tzn., že modifikátorem může být Mg, ale v menším množství, nebo kombinace Mg a KVZ. Po modifikování je třeba zařadit grafitizační očkování.

Pro správně modifikované odlitky je typická feriticko-perlitická matrice se 40 – 70 % feritu.

Litina s červíkovým grafitem leží svými fyzikálními a mechanickými vlastnostmi mezi LLG a LKG. Má dobré slévárenské vlastnosti a její hlavní předností je odolnost při střídavém namáhání tepelnou vodivostí a jinými vlastnostmi.

Tato litina se používá pro tvarově složité odlitky jako jsou hlavy a bloky válců, výfuky, pístové kroužky, atd. Hojně je tato litina aplikována na mechanicky namáhané odlitky, které pracují v podmínkách tepelných rázů. [2]

2.2 Vliv legujících prvků na mechanické a fyzikální vlastnosti litin a ocelí

Legující prvky u ocelí mají několik důležitých úkolů. Stabilizace modifikace železa α a γ , vznik nových fází a v neposlední řadě zlepšení vlastností patří mezi ty nejdůležitější. [3]

Rozhodující vliv na vlastnosti slitin železa má samozřejmě uhlík, ale nemalou měrou se podílí i další prvky, ať už doprovodné či přísadové.

Doprovodné prvky v ocelích lze dále rozdělit na škodlivé jako S, P, O, N, H a prospěšné – Mn, Si, Al, (Cu). Přísadové prvky čili legury mohou být například Cr, Ni, Mn, Si, Mo, W, V, Co, Ti, Al, Cu atd. [4, 5, 6]

Křemík má pro strukturu litiny jako grafitizační přísada zcela mimořádný význam. Jeho obsah určuje, zda litina bude cementitická nebo grafitická. Litinu s lupínkovým grafitem lze definovat jako komplexní slitinu na bázi Fe – Si – C, ve které je obsah Si funkcí rychlosti chladnutí a nebo za přibližně konstantních hodnot tepelné vodivosti stěn formy přímo funkcí tloušťky stěny odlitku. Minimální obsah křemíku musí být dostatečný, aby tavenina i v nejslabší stěně odlitku ztuhla podle stabilní rovnováhy. A naopak tloušťka stěny odlitku temperované litiny má zase důležitý vliv na obsah Si, jehož



maximum je dáno nutností získat při lití ledeburitickou strukturu bez lupínkového grafitu. Obsah fosforu v některých šedých litinách bývá až kolem 1% a u fosforových surových želez i více. Fosfor se rozpouští v malém rozsahu v tuhých roztocích α i γ ; při obsahu větším, než je jeho mezní rozpustnost, tvoří ternární fosfidické eutektikum. V litině s lupínkovým grafitem se toto eutektikum nazývá steadit a tvoří světlé ostrůvky charakteristického tvaru, které s růstem obsahu P získávají výraznou eutektickou strukturu.

Fosfor zlepšuje zabíhavost litiny a odolnost proti otěru. Jeho vliv na grafitizaci při obvyklé koncentraci není výrazný; posouvá linie a body rovnovážného diagramu Fe – C doleva a snižuje uhlíkovou koncentraci eutektického bodu výrazněji než křemík. Se vzrůstajícím obsahem P vzrůstá odolnost proti opotřebení, tvrdost, křehkost a lámavost LLG. Pevnostní hodnoty dosahují maxima obvykle při koncentraci 0,3 až 0,6%P. U houževnatých druhů grafitických litin jako je litina tvárná či temperovaná má být obsah P max. 0,1 %.

Síra je v litinách, podobně jako v ocelích, přítomna převážně jako sirič Fe, Mn S, její obsah ale bývá větší až 0,15%. Síríky podněcují krystalizaci hrubého lupínkového grafitu při malém přechlazení, při vyšším obsahu však síra stabilizuje cementit a podporuje tvorbu ledeburitu. Síra vyvolává lámavost zastudena i zatepla a zhoršuje zabíhavost litiny. [3]

2.2.1 Vliv legujících prvků na mechanické a fyzikální vlastnosti LLG

Litiny se legují s cílem dosáhnout lepších vlastností. Hlavními legujícími prvky jsou vanad, chrom, molybden, měď, nikl a cín, popřípadě i hliník, titan. U karbidotvorných prvků jako je vanad nebo chrom je třeba dbát na množství přísady, aby nedošlo ke vzniku ledeburitu ve struktuře. Tyto prvky musí být proto omezeny nebo kompenzovány prvky grafitotvornými (Cu, Ni). Legování se provádí z důvodu:

- zajištění perlitické struktury v celém průřezu odlitku;
- zlepšení odolnosti proti korozi;
- zvýšení mechanických vlastností – pevnost, tvrdost, odolnost proti opotřebení;



- zlepšení vlastností při zvýšených teplotách – stabilizace mechanických vlastností, zvýšení odolnosti vůči oxidaci, tepelné únavě apod.

Nejlepší mechanické vlastnosti má litina s čistě perlitickou jemnozrnnou strukturou. Této struktury lze docílit kombinací karbidotvorných prvků Cr, V, Mo s grafitotvornými prvky Cu a Ni. Tyto legury snižují kritické rychlosti deformace. Současně zvyšují prokalitelnost a zlepšují možnost tepelného zpracování.

Také přidáním dusíku v rozsahu 70 – 100 ppm dosáhneme perlitické struktury, a tím zvýšení mechanických vlastností. Větší množství způsobuje vznik bublin v litině.

Při zvýšení počtu eutektických buněk se zvyšuje homogenita struktury, pevnost, tvrdost a dynamické vlastnosti litin. Dochází ke zjemnění struktury. Obsah perlitu a jeho rozptyl je závislý nejen na legování, ale hlavně na rychlosti ochlazování. Čím vyšší je rychlost ochlazování, tím větší je podíl perlitu s jemnozrnnou strukturou.

Použití litin s lupínkovým grafitem je mezi -60 °C až 500 °C. K zvýšení odolnosti při vyšších teplotách slouží legury Cr, Ni a Mo. Zjemněním struktury a legováním Cr a dále Cu, Ni, Mo a jejich kombinací se dosáhne zvýšení odolnosti vůči oxidaci.

Mo, Cr, Ni také stabilizují perlit při vyšších teplotách a podporují vznik jemného perlitu, což zvyšuje odolnost vůči tepelné únavě. Dobrou tepelnou vodivost mají litiny s vyšším obsahem uhlíku ve formě volného grafitu.

Odolnost vůči korozi se zvyšuje přidavkem Cu – do 2% snižuje atmosférickou korozi, Ni – do 3% snižuje korozi v neoxidačních kyselinách a Cr – do 0,8% způsobuje zjemnění struktury. Opět je výhodná struktura jemnozrnného perlitu. [2, 3]

2.2.2 Vliv legujících prvků na mechanické a fyzikální vlastnosti LKG

Jediné prvky, které bezvýhradně podporují bezkarbidickou strukturu v litém stavu, jsou C a Si. Rozpustnost C v tekuté slitině vymezuje horní hranice obsahu C, Si, případně zvýšená křehkost, snížená tepelná vodivost, snížení



nárazové práce, zvýšení přechodové teploty při rostoucím obsahu Si. Křemík však zpevňuje ferit a zvyšuje tak jeho tvrdost, hlavně v žíhaném tvaru.

V litině s kuličkovým grafitem se vyskytuje také mangan, který je silně karbidotvorný, proto je jeho max. obsah řízen množstvím Si a tloušťkou stěny odlitku, aby nedocházelo k tvorbě karbidů v litém stavu.

Ve všech vsázkových surovinách tudíž i litinách se vyskytuje fosfor, který vytváří fosfid železa (Fe_3P), což je velmi tvrdá a křehká fáze, která segreguje do naposledy tuhoucích míst. Fosfor způsobuje snížení tažnosti na polovinu, má za následek i snížení houževnatosti, pevnosti, zvýšení popouštěcí křehkosti a to již při obsahu 0,06%P. Doporučuje se používat kvalitní vsázku, která obsahuje minimum P. Jeho obsah by měl být menší než 0,04%.

Příslady jako je Sn, Mo, P, Cu, Ti, Mn, Ni a Cr zabezpečují stabilizaci perlitu, a tím zvýšení mechanických vlastností – pevnosti a tvrdosti. Negativní účinky mají P, Ti, Mn a Cr a z ekonomických důvodů se nedoporučují také ani Ni a Mo. Základní perlitizační přísadou jsou Cu a Sn. Cín má asi 10x větší účinnost než měď, ale jeho nevýhodou je podpora vzniku mezibuňkového lupínkového grafitu. Doporučený obsah Sn je jen 0,05%, kdežto Cu lze použít až do 2%. [2, 3]

2.3 Základní mechanické zkoušky

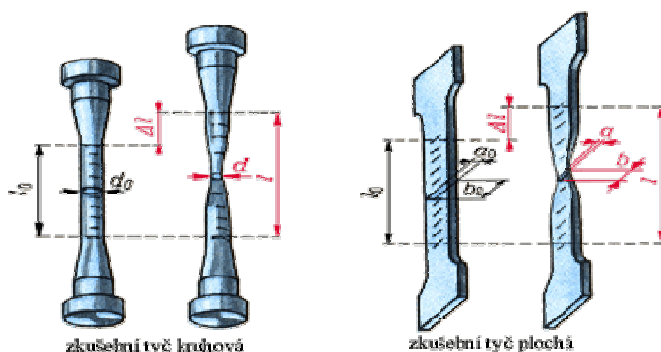
Při vývoji nových materiálů, při přejímkách polotovarů či výrobků, při kontrole jakosti nebo při technologii výroby hraje testování mechanických vlastností nezastupitelnou roli. Některé zkoušky např. zkouška tahem či zkoušky tvrdosti se uplatňují obecně jiné se používají jen ve speciálních případech. Technologické zkoušky, které patří mezi speciální případy, se používají pro posouzení vhodnosti materiálu k určitému způsobu zpracování jako je slévateľnost či tvářiteľnost. Všechny metody zkoušení materiálu prošly historickým vývojem. Asi nejstarší a nejlépe prozkoumanou metodou je zkouška tahem. Další zkoušky následovaly.

Obecně statické mechanické zkoušky vyjadřují chování materiálu za působení vnějších sil. Provádějí se zpravidla za normální teploty, v menším rozsahu při zvýšených nebo snížených teplotách. Nejrozšířenější zkouškou je zkouška tahem, která je normalizována dle ČSN 42 0310. Mezi další

mechanické zkoušky patří zkoušky tlakem, ohybem, stříhem a krutem. Typ zkoušky je dán druhem zkoušeného materiálu. [7, 8]

2.3.1 Zkouška tahem

Zkouška tahem (zkouška trhací) – ČSN EN 10002-1 - je nutná téměř u všech technických materiálů, protože pomocí ní získáme některé základní hodnoty potřebné pro výpočet konstrukčních prvků a volbu vhodného materiálu. Zkoušky tahem se zpravidla dělají na zkušebních tyčích, jejichž tvary a rozměry jsou normalizovány (obr. 2 - 13). Základní měřená délka l_0 závisí na kruhovém průřezu zkušební tyče. Používají se dlouhé tyče, které se označují $10 d_0$ a tyče krátké - $5 d_0$, kde d_0 je průměr zkušební tyče. Trhací zkouškou zjišťujeme pevnost v tahu, poměrné prodloužení, tažnost a zúžení (kontrakci) zkoušeného materiálu.



Obr. 2 - 13.: Tvary zkušebních tyčí pro zkoušku tahem [9]

Při všech statických zkouškách vzniká v zatížené součásti napětí. Je to míra vnitřních sil, které vznikají v materiálu působením sil vnějších. Podíl síly a skutečné plochy průřezu je nazýván skutečným napětím. Běžně se však používají hodnoty smluvních napětí, protože není brána v úvahu změna průřezu tyče a zatížení je tedy vztahováno na původní průřez S_0 .

Mez pevnosti v tahu σ_{Pt} je smluvní hodnota napětí daného podílem největší zatěžující síly F_{max} , kterou snese zkušební tyč, a původního průřezu tyče S_0 :

$$\sigma_{Pt} = \frac{F_{max}}{S_0} \quad [Nmm^{-2}] \quad (2).$$



Celkové prodloužení Δl je rozdíl délky zkušební tyče po přetržení l a původní délky tyče l_0 :

$$\Delta l = l - l_0 \quad [-] \quad (3).$$

Poměrné prodloužení ε je dáno poměrem změny délky Δl k původní délce zkušební tyče l_0 :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} \quad [-] \quad (4).$$

Tažnost A je poměrné prodloužení vyjádřené v procentech:

$$A = \frac{l - l_0}{l_0} * 100 \quad [\%] \quad (5).$$

U tažnosti je indexem (A_5 , A_{10}) označeno, zda se jednalo o krátkou nebo dlouhou zkušební tyč.

Kontrakce (zúžení) Z je dána poměrem zúžení průřezu tyče po přetržení ($S_0 - S$) k původnímu průřezu tyče S_0 . Je také vyjádřena v procentech:

$$Z = \frac{S_0 - S}{S_0} * 100 \quad [\%] \quad (6).$$

Mez kluzu v tahu σ_{kt} je napětí, při němž začínají v materiálu vznikat trvalé plastické deformace:

$$\sigma_{kt} = \frac{F_K}{S_0} \quad [Nmm^{-2}] \quad (7).$$

Mez pevnosti, mez kluzu, tažnost a kontrakce se určují běžně. Méně běžné je měření v oblasti pružných deformací, kde se určuje mez pružnosti a modul pružnosti. [9]

Namáhání v oblasti pružných deformací má velký význam pro konstrukční účely. V této oblasti se úměrně s rostoucím napětím zvětšuje deformace, což je Hookův zákon, který matematicky formuloval Young v roce 1802.

Hookův zákon zní:

$$R = E * \varepsilon \quad [MPa] \quad (8),$$

kde R je napětí,

E je Youngův modul pružnosti v tahu (vyjadřuje odpor vůči deformaci),

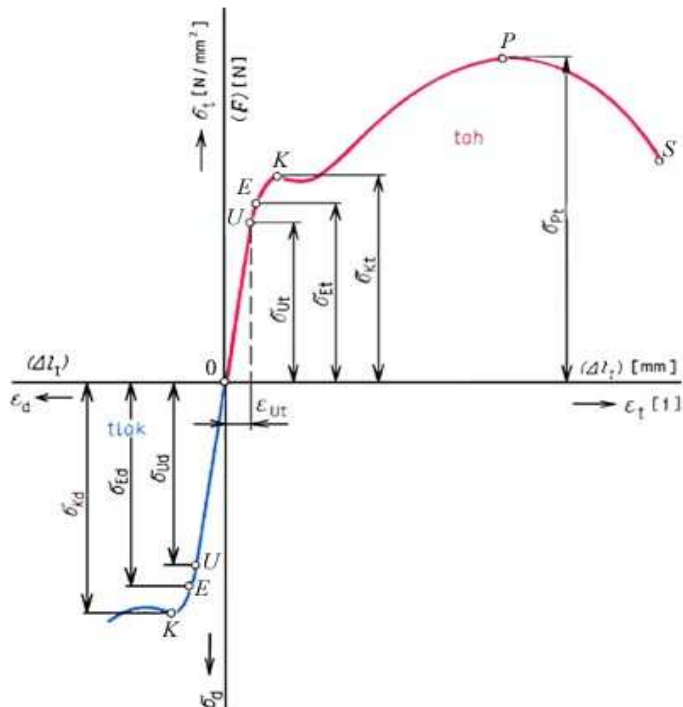
ε je poměrné prodloužení.

Modul pružnosti lze určit podle Hookova zákona ze závislosti síla-prodloužení. Musí být uvedeno, mezi kterými silami byl modul pružnosti určován, přičemž trvalé prodloužení nesmí překročit 0,003% měřené délky. Stanovení modulu pružnosti lze určit dvěma způsoby:

- **z diagramu síla-poměrné celkové prodloužení** jako směrnici počáteční přímkové části diagramu - $\tan \alpha$
- **z diagramu síla-poměrné prodloužení**, který se získá měřením deformací dostatečně citlivým průtahoměrem při postupném zatěžování a odlehčování zkušební tyče

Obě metody jsou zatíženy chybami, které vyplývají ze způsobu zjišťování. Za přijatelný je považován rozptyl výsledků u téhož vzorků 2%. Hodnoty modulu pružnosti vypočítané z celkových deformací jsou o 3-4% vyšší než hodnoty vypočtené z deformací pouze pružných.

Pracovní diagram (obr. 2 – 14) udává závislost poměrného prodloužení ε na napětí σ (nebo změny délky Δl na zatěžující síle F). [10]



Obr. 2 – 14.: Pracovní diagram zkoušky tahem a tlakem u měkké uhlíkové oceli [10]

Bod U - mez úměrnosti je definována jako mezní napětí σ_{Ut} , při němž je prodloužení přímo úměrné napětí (Hookův zákon). Po dalším zatěžování už prodloužení přestává být přímo úměrné zatížení.

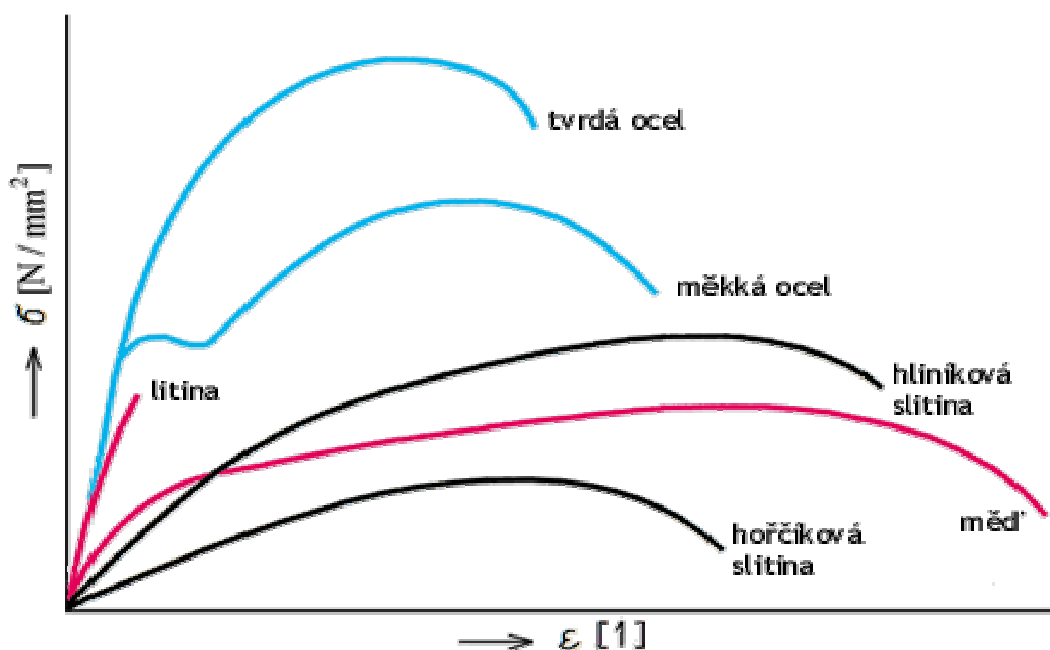
Bod E – mez pružnosti je definována jako mezní napětí σ_E , které po odlehčení nevyvolá trvalé deformace. Jedná se o protažení pružné, tj. tyč nabývá původních rozměrů.

Bod K – mez kluzu v tahu je definována jako nejmenší napětí σ_{Kt} , které způsobuje první trvalou deformaci. V praxi je tato hodnota smluvní označovaná $\sigma_{Kt0,005}$ o velikosti 0,005% původní délky l_0 . Zjišťování této meze je velmi pracné a časově náročné, proto se zjišťuje napětí, které způsobí prodloužení 0,2%. Tato mez kluzu se zjišťuje buď graficky nebo průtahoměrem.

Vrcholem křivky je **bod P**, který odpovídá největšímu napětí σ_{Pt} , což je označováno jako mez pevnosti v tahu.

Bodu S odpovídá napětí, kdy se tyčka přetrhne.

Tvar pracovního diagramu se mění podle druhu materiálu. Na obrázku 2 - 15 jsou uvedeny pracovní diagramy pro některé konstrukční materiály. [10]



Obr. 2 - 15.: Příklady pracovních diagramů různých kovů a slitin [10]

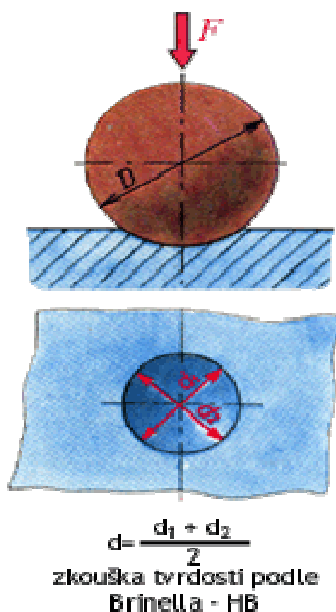
2.3.2 Zkoušky tvrdosti

Tvrdost, jako jedna z mechanických vlastností je velmi důležitá. Je snadno změřitelná, rychlá a levná a lze ji zjistit i u velmi malých předmětů. Z tvrdosti lze posoudit další vlastnosti jako je obrobitelnost, pevnost v tahu, apod. Zkouší se buď na zkušebním vzorku nebo přímo na hotovém výrobku.

Většina tvrdoměrů je založena na definici tvrdosti, která zní: "*Tvrdost je odpor materiálu proti vnikání cizího tělesa.*" Hodnoty tvrdosti se většinou uvádějí bez jednotek nebo, jsou-li odvozeny ze vztahu mezi tlakovou silou a plochou vtisku, mají jednotku N/mm^2 .

Nejznámějšími zkouškami jsou vnikací zkoušky tvrdosti podle Brinella, Rockwella a Vickerse. Tvrdost neželezných kovů (Cu, Sn, Pb, Al a jejich slitiny) zkoušíme nejčastěji podle Brinella, tvrdé a kalené materiály podle Rockwella. Zkouška tvrdosti podle Vickerse je nejpoužívanější.

Pro litiny se používá normalizovaná zkouška podle Brinella ČSN 42 0371 viz obr. 2 - 16. [9]



Obr. 2 -16.: Zkouška tvrdosti podle Brinella [9]

Princip metody spočívá ve vtláčování ocelové kuličky o průměru D do zkušebního tělesa silou F . Síla působí kolmo na povrch tělesa po určitou dobu, po odlehčení zatížení je změřen průměr vtisku d . Měření je opakováno dvakrát, aby došlo k vyloučení chyby vzniklé nepřesností vtisku. Pro praxi se používají tabulky, ve kterých dle průměru vtisku a velikosti zatížení najdeme přímo odpovídající tvrdost. Označení tvrdosti podle Brinella je tvořeno



značkou tvrdosti HB a údaji z podmínek zkoušky. Tyto údaje jsou odděleny šikmou zlomkovou čarou. Příklad označení HB5/7500/30 = 320 znamená, že zkouška byla vykonána s těmito parametry: průměr zkušební kuličky $D = 5$ mm, velikost působící síly $F = 7500$ N a doba zatížení $t = 30$ s. Pro obvyklé podmínky, tj. HB10/30000/10 je používáno označení jen HB = 210 bez zkušebních parametrů.

Průměr zkušební kuličky může být 10, 5, 2.5 a 1 mm a je buď z kalené oceli (do HB = 400) nebo ze slinutých karbidů. Doba zatížení je u slitin železa 10 až 15 s a zatěžování musí být plynulé bez rázů. Tvrdost HB je závislá na zatížení.

Nevýhodou této zkoušky je obtížné a nepřesné proměření vtisku, na který má velký vliv vtažení na pokraji vtisku u nezpevněného materiálu nebo naopak vytlačení obvodového valu u materiálu zpevněného. Zkouška podle Brinella se nedoporučuje používat u kalených materiálů.

Výhodou této zkoušky je empiricky zjištěná přímá závislost mezi tvrdostí a pevností v tahu σ_{Pt} u kovových materiálů. [10]

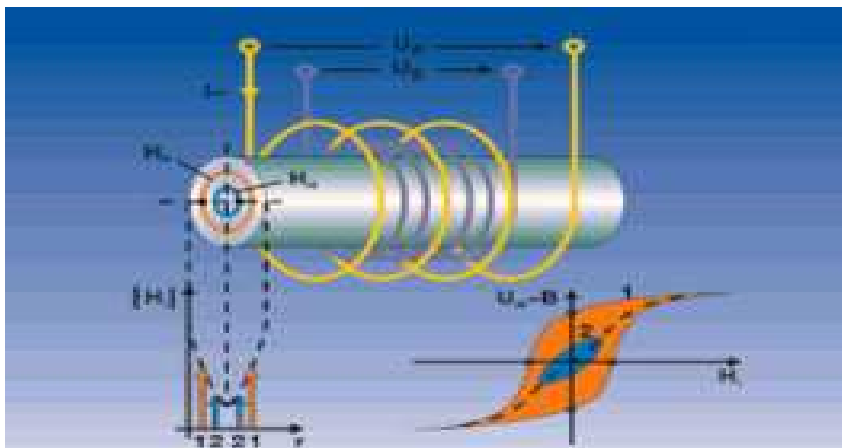
$$\sigma_{Pt} = (0,31 \text{ až } 0,41) \text{ HB} \quad (9)$$

2.3.3 Nedestruktivní zkoušení materiálu

Nedestruktivní metody zkoušení materiálu mají značný význam pro zvyšování jakosti i spolehlivosti výrobků ve všech oborech, zejména ve strojírenství. Při zaručené celistvosti materiálu lze maximálně využívat všech jeho mechanických vlastností. Zjišťování vad defektoskopickými metodami je většinou nepřímé. Prostředníkem je fyzikální veličina, která v interakci s prostředím mění své parametry. Změna parametrů této veličiny závisí na homogenitě prostředí, tj. zkoušeného materiálu. Anomálie charakteru fyzikálního prostředí způsobují v průběhu zkušební veličiny její lokální změny. Rozbor a měření těchto změn je ekvivalentní zjišťování vad a stanovení jejich velikosti, tvaru a polohy a je základem metod nedestruktivního zkoušení materiálu a výrobku. Metoda vířivých proudů patří mezi nedestruktivní zkoušky - magnetoinduktivní metody. [11, 12]

Magnetoinduktivní metody využívají frekvence v rozsahu od několika Hz až po cca 1000 Hz, zpravidla ve spojení s absolutní cívkou. Všeobecně jsou

používány ke kontrole komplexních technologických vlastností, jako je chemické složení, struktura, tvrdost, pevnost, el. vodivost či permeabilita.[13]



Obr. 2 – 17.: Princip magnetoinduktivní metody [13]

Magnetoinduktivní metodou je možné zkoušet jádro a povrch dílů odděleně pouze změnou zkušební frekvence. [13]

2.3.3.1 Vířivoproudé zkoušení

Patří mezi zkoušky magnetoinduktivní a elektroinduktivní (zkoušky elektromagnetické).

Má široké uplatnění zejména v hutních provozech a ve vstupních a výstupních kontrolách polotovarů strojírenských podniků. Některé z variací těchto zkoušek lze plně automatizovat.

Metoda vířivých proudů je založena na stanovení změn fyzikálních vlastností materiálu pomocí střídavého magnetického pole.

Jestliže prochází střídavý magnetický tok tělesem, indukuje se v něm elektromagnetická síla a vznikají proudy, které nazýváme vířivé proudy. Hustota a rozložení indukovaných vířivých proudů ve zkoušeném tělese závisí na fyzikálních vlastnostech a geometrii magnetovaného tělesa. Tato souvislost je základem metod vířivých proudů. Fyzikální vlastnosti (zejména elektrická vodivost a permeabilita) jsou dány strukturou materiálu. Rozměry zkoušeného tělesa (geometrie) jsou ovlivněny existencí vad. [11]

2.3.3.1.1 Princip vířivoproudého zkoušení

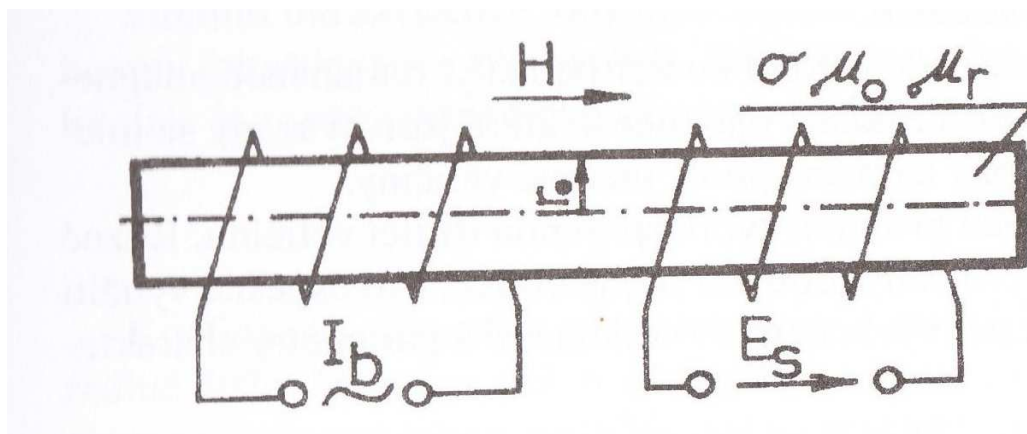
Vířivé proudy ve zkoušeném tělese jsou indukovány střídavým magnetickým polem cívky protékané střídavým proudem. Tyto vířivé proudy svými magnetickými účinky působí zpětně na budící pole. Obě magnetická pole se vektorově skládají a výsledné magnetické pole tedy mimo frekvence magnetizačního proudu závisí na magnetických vlastnostech a rozměrech materiálu.

Základem přístrojové konstrukce jsou budicí a snímací cívky. Napětí ze snímacích cívek je většinou upravováno a zesilováno v zařízení s obvody umožňujícími provést fázovou selekci a kompenzaci rušivých vlivů. Výstup je buď analogový, na obrazovce nebo číslicový.

Podle uspořádání snímacích cívek vzhledem ke vzorku se rozeznávají dvě metody:

- 1) metoda s průchozí cívkou;
- 2) metoda s příložnou cívkou.

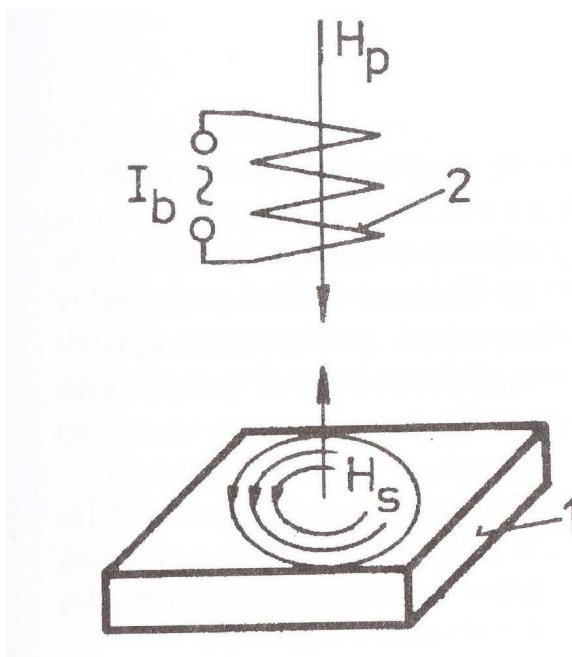
U metody s průchozí cívkou (obr. 2 – 18) prochází kontrolovaný materiál cívkou s dvojitým vinutím – magnetizačním a snímacím. Metoda je tedy vhodná pro kontrolu tyčového materiálu např. šroubů, drátů, čepů aj. a jeho automatizaci.



Obr. 2 – 18.: Průchozí cívka s dvojitým vinutím (budícím a snímacím) [11]

Metoda s příložnou cívkou byla vypracována pro velké a neprizmatické výrobky. Cívka napájená střídavým proudem se radiálně přikládá k povrchu zkoušeného tělesa (obr. 2 – 19). Magnetické pole vířivých proudů zpětně ovlivňuje vlastnosti příložné cívky a způsobuje změnu její impedance. H_p je

primární (budící) magnetické pole magnetizačního proudu v cívce, H_p je sekundární (reakční) magnetické pole vířivých proudů. [11]



Obr. 2 – 19.: Princip příložné cívky [11]

2.3.3.1.2 Výhody a nevýhody metody vířivých proudů

Jedním z hlavních kladů metody vířivých proudů je velká různorodost měření.

Vířivé proudy jsou používány pro :

- Zjišťování trhlin;
- Měření tloušťky materiálu;
- Měření tloušťky nátěru;
- Měření vodivosti pro:
 - identifikaci materiálu;
 - detekci tepelného poškození;
 - stanovení hloubky pláště;
 - kontrolu tepelného zpracování.

Výhody měření vířivými proudy jsou:

- citlivost na malé trhliny a další defekty;
- okamžité výsledky;
- přenosnost vybavení;
- minimální příprava vzorků;



- vyšetření složitých tvarů a velikosti vodivých materiálů bez přímého kontaktu sondy se zkoušeným materiálem. [14]

Stejně jako každá metoda má i tato svá omezení. Vířivé proudy mají sklon soustředit se na povrchu materiálu, a proto mohou být používány jen pro zjištění povrchových a podpovrchových vad. Mezi další zápory patří např.:

- nutnost vodivosti materiálu;
- dostatečný přístup sondy k povrchu materiálu;
- nevhodná povrchová úprava a hrbatost;
- nastavení dle etanolu;
- omezení zjištění vad orientovaných určitým směrem;
- omezení hloubky penetrace (průchodu);
- rozsáhlejší školení a nutnost jisté zručnosti obsluhy.

Je nutné si vždy dobře rozmyslet, kdy a kde se dá tato metoda vhodně použít. Testování pomocí vířivého proudu je však v dnešní době široce užívanou technikou. [14]

2.3.3.1.3 Použití metody vířivých proudů

Jak již bylo napsáno, zkoušení vířivými proudy je používáno v různých průmyslových odvětvích. Metoda podává informace o defektech a zároveň poskytuje cenné údaje o daném materiálu.

V tenkých materiálech mohou být vířivé proudy použity pro měření tloušťky materiálu, tak dokáže také zjistit poškození korozí, která způsobí zeslabení stěny. Touto technikou lze měřit tloušťku nátěrů a dalších povlaků. Používá se např. při měření leteckého oplechování nebo na stěnách trubek pro výměníky tepla.

Pomocí této metody na základě vlastností jako je např. magnetická permeabilita a elektrická vodivost lze třídit a rozeznávat materiály. Pokud by byl materiál tepelně zpracován nebo přišel do styku s vysokou teplotou ovlivnilo by to vodivost materiálu.

Použití je opravdu široké také díky pestrému výběru vybavení, sond a snadnému počítačovému zpracování dat. [14]



2.3.3.2 Ultrazvukové zkoušení

Jednou z nejpoužívanějších a proto nejdůležitějších metod nedestruktivního zkoušení je ultrazvuková defektoskopie. Ultrazvukové zkoušení lze použít pro širokou škálu různých materiálových analýz. Pomocí této metody lze zjišťovat necelistvosti materiálu vznikající ve výrobě i v provozu jako důsledek mechanického namáhání. [12, 15]

Ultrazvukové NDT je asi nejpoužívanějším akustickým zkoušením v oboru měření tloušťky materiálu, zjišťování trhlin a zvukového zobrazování. Vysokofrekvenční zvukové vlny lze aplikovat rovněž pro rozpoznávání a kvantifikaci základních mechanických a strukturálních vlastností a složení materiálů. Ultrazvuková analýza využívá jednoduchý fyzikální princip. Pohyb každé vlny je ovlivněn médiem, jímž prochází. Tak lze často změny snadno měřitelných parametrů (čas průchodu, útlum, rozptyl a frekvenční obsah) spojených s průchodem vysokofrekvenční zvukové vlny vztáhnout ke změnám fyzikálních vlastností, jako jsou tvrdost, modul pružnosti, hustota, homogenita a zrnová struktura zrn. [15]

2.3.3.2.1 Ultrazvukové vlny

Ultrazvuk jsou mechanické kmity částic prostředí, jejichž frekvence jsou vyšší než 20 kHz. Pro ultrazvukové nedestruktivní zkoušení se v průmyslu využívají frekvence do 15 MHz.

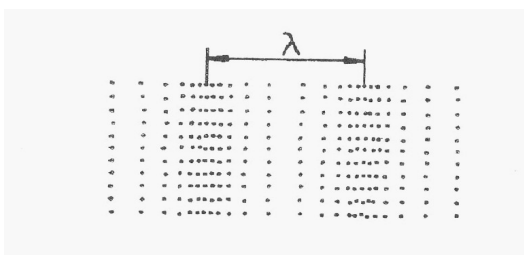
V současné době je nejběžnější impulsové vysílání ultrazvukových kmitů. Kromě tohoto způsobu lze vysílat i spojitě, tj. nepřetržitě. [12]

Při šíření ultrazvukové vlny prostředím se jeho částice rozkmitávají v různém směru vzhledem ke směru postupu vlny. Podle toho rozlišujeme druhy ultrazvukových vln. Pro různé druhy vln je charakteristická jiná rychlost šíření, která závisí na elastických konstantách a hustotě pevné látky.

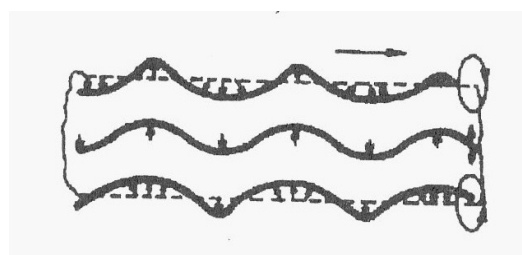
Druhy ultrazvukových vln jsou podélné, příčné, povrchové (Rayleighovy), deskové ohybové (Lambovy asymetrické) a deskové dilatační (Lambovy symetrické). Pro akustické zkoušení materiálu jsou důležité především vlny podélné a příčné. [12]

❖ Podélné vlny (L – longitudinální)

Při podélné vlně částice prostředí kmitají po přímkové dráze ve směru šíření vlny (obr. 2 - 20). Při tomto pohybu se prostředí střídavě zhušťuje a zředňuje, tj. vzniká střídavý tlak a tah. Přitom dochází i ke změně objemu prostředí. Podélné vlny se mohou šířit tuhým, kapalným i plynným prostředím. Jde o vlny, se kterými se setkáme nejčastěji. Podmínkou pro šíření podélné vlny je dostatečně velký rozměr prostředí vzhledem k délce vlny. Těsně pod povrchem se šíří zvláštní druh podélné vlny – vlna podpovrchová (obr. 2 - 21)



Obr. 2 – 20.: Podélné vlnění [11]



Obr. 2 – 21.: Povrchové vlnění [11]

Rychlost šíření podélných vln c_L :

- v neohraničeném prostředí

$$c_L = \sqrt{\frac{E * (1 - \mu)}{\rho * (1 + \mu) * (1 - 2\mu)}} \quad [\text{m/s}] \quad (10)$$

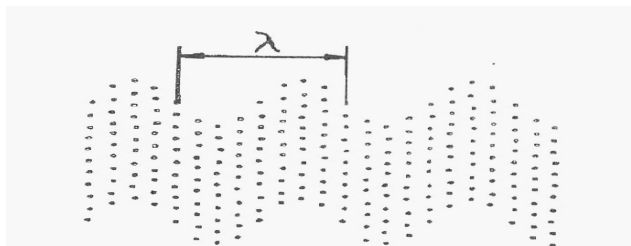
E - je modul pružnosti v tahu

μ - Poissonovo číslo (pro všechna tuhá prostředí je $\mu = 0$ až 0,5)

ρ - hustota prostředí

❖ Příčné vlny (T – transverzální)

I příčné vlny jsou důležité pro zkoušení materiálu. Ty se však mohou šířit jen v tuhém prostředí s rozměry mnohem většími, než je délka vlny. Částice prostředí kmitají po přímkové dráze, avšak kolmo na směr šíření (obr. 2 - 22). Příčné vlny se nemohou šířit v kapalinách a plynech. Výjimku tvoří pouze pasty a kapaliny s velkou viskozitou.



Obr. 2 – 22.: Příčné vlnění, kde λ značí vlnovou délku [11]



Příčná vlna je polarizovaná v rovině kolmé na směr šíření. Při natočení zdroje příčných vln se natáčí i rovina kmitání částic. Při šíření příčných vln nevzniká zhuštění a zředění, nýbrž částice se pouze vzájemně posunují. Proto se při šíření příčné vlny nemění objem prostředí. [11, 12]

Rychlost šíření příčných vln c_T :

- v neohraničeném prostředí

$$c_T = \sqrt{\frac{E}{2 * \rho * (1 + \mu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad [\text{m/s}] \quad (11)$$

E - je modul pružnosti v tahu

G - je modul pružnosti ve smyku

μ - Poissonovo číslo (je charakteristikou chování materiálu)

ρ - hustota prostředí

Poměr rychlosti šíření obou druhů vln závisí pouze na Poissonově čísle μ .

$$\frac{c_T}{c_L} = \sqrt{\frac{1 - 2\mu}{2 * (1 - \mu)}} \quad [-] \quad (12)$$

Obecně lze říci, že příčné vlny mají v pevných látkách cca poloviční rychlost vln podélných.

Na Poissonově čísle závisí i poměr modulů pružnosti. Modul pružnosti v tahu E, ve smyku G a Poissonovo číslo μ jsou charakteristikami chování materiálu. Poissonovo číslo je poměr deformace tělesa ve směru napětí a kolmo k němu. [12]

$$\frac{E}{G} = 2 * (1 + \mu) \quad [-] \quad (13)$$

2.3.3.2.2 Zdroje ultrazvuku

Ultrazvukové měniče též zdroje ultrazvukové energie jsou zařízení, ve kterých nastává přeměna určitého druhu energie (elektrické, kinetické,...) na energii ultrazvuku.

Zdroje ultrazvuku jsou nejčastěji založeny na piezoelektrickém jevu, který je nejvýznamnější z hlediska nedestruktivní strukturoskopie. Další zdroje pak jsou např.: magnetostrikční jev (změna rozměrů při zmagnetování), termoakustický jev, princip elektrického a elektromagnetického pole. [12]



Piezoelektrický jev je schopnost krystalu generovat elektrické napětí popřípadě jev opačný, kdy se krystal v elektrickém napětí deformuje. Vyskytuje se pouze u krystalů, které nemají střed symetrie. Nejznámější piezoelektrickou látkou je křišťál a křemen.

Piezoelektrický jev vzniká tak, že se ionty opačných nábojů deformací posunou v krystalové mřížce tak, že elektrická těžiště kationtů a aniontů, která v nezdeformovaném krystalu souhlasí, se od sebe vzdálí. Na určitých plochách krystalu se objeví elektrický náboj.

Obrácený piezoelektrický jev využívá vnějšího elektrického pole k posunutí iontů, což vede k deformaci krystalu. Je-li pole časově periodicky proměnné s kmitočtem, který odpovídá kmitočtu vlastních elastických kmitů krystalu, vzniká mechanická rezonance, která se využívá např. v lékařských fonografech. Oba piezoelektrické jevy se pak používají v ultrazvukové defektoskopii. [12, 15]

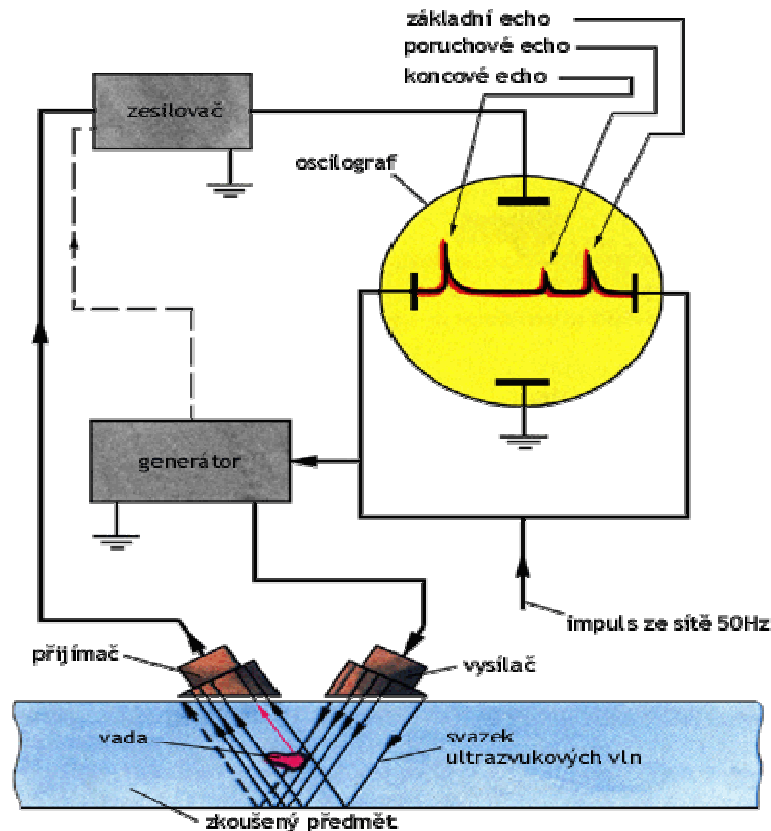
2.3.3.2.3 Princip

Frekvenční rozsah ultrazvukové NDT je od asi 20 kHz do více než 100 MHz. Nejvyužívanější rozsah je 500 kHz až 20 MHz. Běžně se používají podélné i příčné vlny, ve zvláštních případech pak i povrchové (Rayleigh) vlny a plošné (Lamb) vlny. Kratší vlnové délky lépe reagují na změny v médiu, jímž procházejí. Mnoho materiálových analýz využívá ty nejvyšší frekvence, které materiál dovoluje. [15]

Při těchto zkouškách jsou používány impulsní defektoskopy, kde zvukové impulsy generují a přijímají piezoelektrické snímače akusticky spojené s testovacím materiálem, pracující na principu radaru. Ty mají buď jednu sondu, která pracuje střídavě jako vysílač i přijímač nebo dvě sondy, kde je jedna sonda vysílací a jedna přijímací. K tomuto účelu se využívá řada komerčních nástrojů s analogovým i digitálním zpracováním signálu. [9]

2.3.3.2.4 Přehled metod

Nejrozšířenější z těchto zkoušek je **metoda odrazová**, při které se do zkoušeného materiálu vysílá krátkodobý ultrazvukový impuls, v němž se po odrazu od protilehlé stěny nebo od možné vady opět přijímá (obr. 2 - 23).

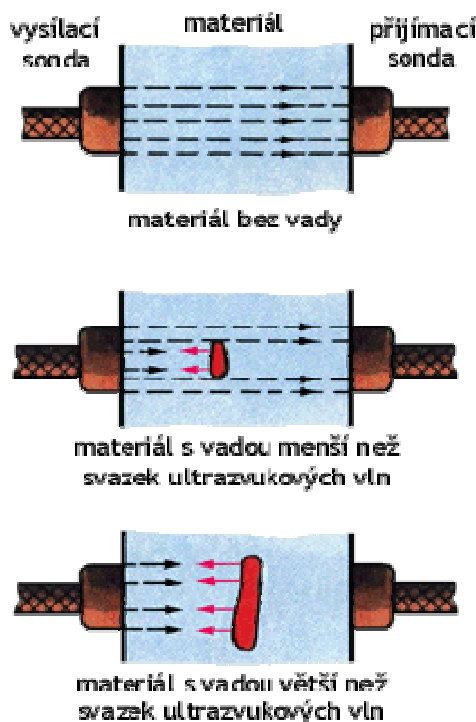


Obr. 2 – 23.: Princip ultrazvukového defektoskopu – metoda odrazová [9]

Působením řídicího impulsu se rozkmitá oscilační obvod generátoru (vysokofrekvenčního elektronkového oscilátoru s frekvencí od 0,5 do 5 MHz). Jeho kmity jsou přeneseny na křemenný krystal umístěný ve vysílači, který vyšle do zkoušeného materiálu svazek ultrazvukových vln. Část budícího impulsu se při tom zavede přes zesilovač do oscilografu, na jehož stínítku se objeví kmit - základní echo. [9]

Svazek ultrazvukových vln prostupuje materiálem, narazí na protější stěnu, kde se odrazí a vrátí se zpět do přijímače, kde rozkmitá jeho krystal. Vzniklé elektrické kmity se vedou přes zesilovač do oscilografu, na jehož stínítku se objeví koncové echo. Je-li v materiálu vada (trhlina, dutina apod.), odrazí se od ní část ultrazvukových vln. Ty dospějí do přijímače dříve a na stínítku oscilografu se projeví jako poruchové echo.

Další aplikovaná metoda je **průchodová** (obr. 2 - 24). Ultrazvukové vlny se vysílají do zkoušeného předmětu na jedné straně a přijímají se na straně druhé. Je-li v materiálu vada, na její ploše se odrážejí ultrazvukové vlny, takže za vadou vzniká ultrazvukový stín. Tato metoda je užívána např. při zjišťování zdvojení plechů. [9, 11]



Obr. 2 – 24.: Princip průchodové metody [9]

Metoda rezonanční se uplatňuje při hromadné výrobě menších odlitků štíhlých tvarů. Hodnotí se celý objem odlitku, respektive kmitající části. Používá se k měření tloušťky prostředí za použití stojatých vln, které vznikají při spojitém vysílání nebo na tahem namáhané úchyty. [12]

2.3.3.2.5 Přehled měřených parametrů

Ve většině případů se měří některý z těchto parametrů:

1) **Rychlost zvuku/doba průchodu impulsu:** Většinou nejsnadněji měřitelným parametrem je rychlost zvuku. V homogenním médiu se přímo vztahuje k modulu pružnosti a hustotě. V tom případě bude mít změna pružnosti či hustoty vliv na čas průchodu impulsu vzorkem dané tloušťky. Na rychlost zvuku může mít dále vliv i různá úroveň nehomogenosti.



2) **Útlum:** Různé materiály pohlcují či tlumí zvukovou energii rozdílně, dle různých kombinací hustoty, tvrdosti, viskozity a molekulární struktury. Míra útlumu v daném materiálu běžně roste s frekvencí.

3) **Rozptyl:** Zvukové vlny se odrážejí od rozhraní mezi různými materiály. Na amplitudu, směr a frekvenční obsah rozptýleného signálu mohou mít vliv změny ve struktuře zrn, orientaci vláken, poréznosti, koncentraci částic a další mikrostrukturální odchylky. Efekt rozptylu je možno sledovat rovněž nepřímo ve změnách amplitudy ozvěny od zadní stěny nebo signálu při přenosu.

4) **Frekvenční (spektrální) obsah:** Všechny materiály do jisté míry fungují jako filtry dolní hranice, tlumící či rozptylující spíše součásti širokopásmové zvukové vlny s vyšší frekvencí. Tím pádem může analýza změn zbývajícího frekvenčního obsahu zvoleného širokopásmového impulsu, který prošel testovaným materiálem, sledovat výše uvedený kombinovaný efekt útlumu a rozptylu.

V některých případech lze přímo využívat ultrazvuková data k výpočtu vlastností, jako je například modul elasticity, v jiných představuje ultrazvukové testování srovnávací metodu. Zde je nutno experimentálně posoudit referenční standardy představující škálu hodnocených vlastností materiálů, na jejichž základě bude možno sestavit zkušební protokol. Z těchto standardů bude možno zaznamenat, jak se parametry přenosu zvuku mění se změnou konkrétních vlastností materiálu. Z těchto základních informací pak bude možno určit či předpokládat obdobné změny v testovacích vzorcích. [15]

2.3.3.2.6 Přístroje a použití

Pro materiálovou analýzu je k dispozici široká škála ultrazvukových přístrojů. Rychlost zvuku lze měřit jednoduchými ručními přístroji na měření tloušťky materiálu, zatímco rychlost, útlum a rozptyl lze pozorovat moderními digitálními detektory trhlin. S příslušným pomocným vybavením a ultrazvukovým zobrazovacím zařízením s příslušným softwarem je lze využít ke kvantifikaci těchto vlastností a také k provedení spektrální analýzy (frekvenční obsah).



Široký rozsah přístrojů a jejich použití řadí ultrazvukovou defektoskopii k jedněm z nejpoužívanějších zkušebních metod.

Například z rychlosti podélné a příčné vlny společně s hustotou materiálu lze vypočítat Youngův modul a příčný modul v homogenních, nedisperzních materiálech. Použití vlnovodů umožňuje měření za vysokých teplot. Měřením rychlosti také lze určit tvar, formu a množství grafitu v litině. Naměřené hodnoty rychlosti lze také vztáhnout ke stupni vytvrzení pryskyřic a betonu. Další použití např.: měření velmi vysokých teplot (přes 3000°C), určování míchacího poměru mezi tekutinou a pevnou látkou, odchylky molekulární struktury u plastů (délka či orientace polymerových řetězců) atd.. [15]



3. Praktická část

V této kapitole jsou formou tabulek příp. grafů znázorněny a vyhodnoceny výsledky měření na vzorkách. Úplné tabulky se všemi naměřenými a vypočítanými hodnotami jsou kvůli přehlednosti a úpravě v příloze. Diskuze výsledků a závěr je zpracován na konci kapitoly.

3.1 Použité vzorky

Vzorky byly vybrány z prací pana ing. Jana Dočekala a pana ing. Jana Šmrhy. Jedná se o Y-bloky a desky, ze kterých byly odebrány vzorky na mechanické zkoušky na trhacím stroji.

Vzorky litin s lupínkovým, červíkovým a kuličkovým grafitem pana ing. Dočekala realizovala slévárna FOCAM Olomouc. Litiny byly po metalurgickém ošetření odlity do forem zkušebních bloků Y1 a Y2. Složení taveb u LLG se lišilo odstupňovaným obsahem Cu tak, aby tavby – označené A, B, C a D - zahrnuly jakostní stupně dle ČSN 42 2420, ČSN 42 2425 a ČSN 42 2430. Z bloků pak byly odříznuty hranoly a plochy řezů byly ofrézovány pro měření tvrdosti HB a dalších veličin. Dále byly z Y-bloků vyrobeny zkušební tyčky na zkoušku tahem.

Litiny s kuličkovým a červíkovým grafitem byly také odlity do Y-bloků a byly z nich připraveny zkušební tyčky na zkoušku tahem. Z taveb byly vybrány 4 vzorky. Dva vzorky byly LKG o obsahu Cu jednou 1% a jednou 0% a zbylé dva vzorky zase LČG o stejném obsahu Cu jako u LKG, tj. o obsahu Cu = 1% a Cu = 0%.

Vzorky vybrané od pana ing. Šmrhy jsou litiny s kuličkovým grafitem o různém obsahu Si. Jsou to odlitky ve tvaru obdélníkových destiček s nestejnou tloušťkou. Byly vybrány tloušťky destiček 8 a 10 mm o rozměrech 44x160 mm. Pro stanovení mechanických hodnot byly odlity i zkušební tyče o \varnothing 30 mm a délce 115 mm. Vzorky byly odlévány ve svislé poloze. V příloze je obrázek odlitku tvaru desek.

Chemické složení s odstupňovaným obsahem Cu a Si i s označením vzorků bylo zpracováno do přehledných tabulek, které jsou opatřeny ještě dodatečnými vysvětlivkami o označení vzorku. [16, 17]



3.2 Chemické složení vzorků

3.2.1 Litina s lupínkovým grafitem s různým obsahem Cu

Byly provedeny vždy 2 tavby označené dle obsahu mědi A - D na blocích Y1 a Y2. Ypsilon bloky jsou normalizovány dle ČSN EN 1561 – Slévárenství - Litiny s lupínkovým grafitem, a mají různou tloušťku. Blok Y1 = 12,5 mm a Y2 = 25 mm. Y-bloky jsou geometricky rozděleny na zdravou a nálitkovou (příkřejší) část. Mechanické zkoušky byly provedeny taktéž na Y-blocích. Chemické složení a stupeň eutektičnosti Y-bloků 1 a 2 je uveden v tabulce č. 3 – 1.

Tabulka č. 3 - 1: Chemické složení LLG s odstupňovaným obsahem Cu

číslo tavby	C	Si	Cu	Mn	P	S	Ni	S _C
	%	%	%	%	%	%	%	
3479 A	3,15	2,24	0,02	0,19	0,02	0,016	0,01	0,887
3479 B	3,03	2,21	0,43	0,19	0,02	0,016	0,01	0,852
3494 C	3,03	2,21	0,74	0,22	0,02	0,016	0,02	0,852
3494 D	3,17	2,17	1,41	0,21	0,03	0,017	0,02	0,888

Stupeň eutektičnosti S_C a obsah P a S jsou poměrně nízké.

Fotky struktur viz příloha.

3.2.2 Litina s kuličkovým a červíkovým grafitem s různým obsahem Cu

Byly použity vzorky připravené z Y-bloků taveb firmy FOCAM. Tyto Y-bloky jsou taktéž normalizovány a to dle ČSN EN 1563 – slévárenství litina s kuličkovým grafitem.

V tabulce č. 3 - 2 jsou 4 tavby označené JD1 – JD4 a u nich vždy označení o jakou původní tavbu a litinu se jedná. Podrobnější popis litin bude u obrázků mikrostruktur, které jsou součástí přílohy.



Tabulka č. 3 - 2: Chemické složení LKG a LČG s různými hodnotami Cu

číslo tavby	C	Si	Cu	Mn	P	S	Mg	Cr
	%	%	%	%	%	%	%	%
JD1 LKG (tavba 1)	3,41	2,20	1,02	0,25	0,02	0,014	0,045	0,06
JD2 LKG (tavba 5)	3,30	2,45	0,04	0,25	0,02	0,016	0,046	0,05
JD3 LČG (tavba 3)	3,46	2,12	0,05	0,26	0,02	0,014	0,019	0,07
JD4 LČG (tavba 4)	3,63	2,44	1,01	0,26	0,03	0,022	0,016	0,04

3.2.3 Litina s kuličkovým grafitem s různým obsahem Si

Z provedených taveb bylo vybráno 6 vzorků, které jsou označeny JS111 - JS116 o různém obsahu Si a uvedeny v tabulce č.3 – 3. Každá tavba zahrnovala 5 destiček s tloušťkou 3, 4, 5, 8 a 10 mm. Byly vybrány desky tloušťek 8 a 10 mm, protože pro tenké desky je ultrazvukové měření nepřesné.

Tabulka č. 3 - 3: Chemické složení LKG s různými hodnotami Si

číslo tavby	C	Si	Cu	Mn	P	Mg	Al	Sc
	%	%	%	%	%	%	%	
JS111 (tavba V)	3,42	2,71	0,010	0,036	0,023	0,022	0,018	1,003
JS112 (tavba 17)	3,42	3,85	0,008	0,002	0,024	0,040	0,017	1,119
JS113 (tavba 18)	2,97	3,53	0,011	0,224	0,027	0,035	0,021	0,940
JS114 (tavba 19)	3,38	3,89	0,035	0,181	0,025	0,040	0,029	1,109
JS115 (tavba 20)	3,35	3,70	0,022	0,250	0,026	0,041	0,021	1,078
JS116 (tavba 21)	3,33	3,48	0,080	0,144	0,030	0,043	0,022	1,049



3.3 Mechanické hodnoty

3.3.1 Mechanické hodnoty LLG s různým obsahem Cu

K získání mechanických hodnot byly použity vzorky připravené z Y-bloků, ale protože data ze zkoušky tahem byla jen doplňující pro předchozí práci, nepodařilo se získat všechny hodnoty. Měření tvrdosti probíhalo za podmínek HB5/750/20 na tvrdoměru BRINELL HPO 3000. Tabulka uvádí střední hodnoty měření HB. Bylo měřeno třikrát po obou stranách Y-bloků. Hodnoty HB jednoznačně neurčují jakost litin. Mechanické hodnoty byly měřeny školním laserovým extenzometrem TIROtest 2300. Tento počítačově řízený přístroj je vhodný pro zkoušky tahem, tlakem a ohybem. Rozsah přístroje se mění výměnou měřících hlav. Naměřené hodnoty jsou zpracovány v tabulce č. 3 – 4.

Tabulka č. 3 – 4: Mechanické hodnoty LLG

Vzorky	typ Y-bloku	Ø HB	Mechanické hodnoty z Y-bloků		
			Rm (Mpa)	A (%)	E (Mpa)
3479 A (0,02 % Cu)	1Y 1A	188,5			
	1Y 2A	176,0	240,32		
	2Y 1A	171,5			
	2Y 2A	174,5			
3479 B (0,43 % Cu)	1Y 1B	196,5	272,91		
	1Y 2B	190,0	241,29		
	2Y 1B	190,0	268,27		
	2Y 2B	187,5	239,46		
3494 C (0,74 % Cu)	1Y 1C	194,0			
	1Y 2C	196,5	234,63		
	2Y 1C	202,5	284,43		
	2Y 2C	189,0	242,65		
3494 D (1,41 % Cu)	1Y 1D	201,0			
	1Y 2D	202,0	274,27		
	2Y 1D	210,5			
	2Y 2D	201,0	257,13		

Vysvětlení označení vzorků: 1Y 1A

1 znamená 1.tavba

Y1 znamená blok Y1 = 12,5 mm

A znamená tavba s nejnižším obsahem Cu



Bohužel, další mechanické hodnoty nebyly k dispozici. Ale vzhledem k tomu, že v LLG neplatí Hookův zákon bylo by měření stejně neprůkazné. Z tabulky alespoň můžeme vyčíst, že s rostoucím obsahem Cu roste také tvrdost litiny.

3.3.2 Mechanické hodnoty LKG a LČG s různým obsahem Cu

Z Y-bloků byly vyrobeny polotovary ve formě tyčí, na kterých byla měřena tvrdost. Další úpravou těchto polotovarů byly vyrobeny zkušební tyče, na kterých byla provedena zkouška tahem. Měření tvrdosti probíhalo za podmínek HB10/3000/20. Hodnoty naměřené na zkušebních tyčích jsou v tabulce č. 3 – 5.

Tabulka č. 3 – 5: Mechanické hodnoty LKG a LČG

Vzorky	typ Y-bloku	Ø HB	Mechanické hodnoty z Y-bloků			
			Rm (Mpa)	Rp _{0,2} (Mpa)	A (%)	E (GPa)
JD1 LKG (tavba 1) (1 % Cu)	Y1-4a	246,00	825	475	9,23	206,82
	Y1-4b	215,17	824	476	10,94	174,86
	Y2-3a	228,33	804	386	8,99	189,26
	Y2-3b	233,00	800	443	8,34	193,97
JD2 LKG (tavba 5) (0 % Cu)	Y1-1a	161,33	427	290	18,41	167,79
	Y1-1b	159,00	410	287	8,11	179,29
	Y2-3a	166,33	432	291	20,00	216,69
	Y2-3b	162,33	427	291	18,62	166,41
JD3 LČG (tavba 3) (0 %Cu)	Y1-1a	151,67	314	230	7,73	153,77
	Y1-1b	172,83	318	230	6,92	149,41
	Y2-3a	153,00	298	230	5,77	157,77
	Y2-3b	149,67	299	230	6,04	149,16
JD4 LČG (tavba 4) (1 % Cu)	Y1-2a	166,17	-	-	-	-
	Y1-2b	164,50	418	323	3,33	141,71
	Y2-1a	161,17	408	318	3,37	119,82
	Y2-1b	154,00	-	-	-	-

Vzorky označené původně jen číslem tavby, byly doznačeny, aby bylo jednoznačné, o jaký typ litiny se jedná. Vzorky bez mechanických hodnot byly poslány na vyhodnocení do Prahy, kde je zkoumali nějakou novou metodou, a jejich vyhodnocení nebylo posláno zpět.



Vysvětlivky k označení vzorků:

JD1 LKG = 1. tavba, C = 1%

JD2 LKG = 5. tavba, C = 0%

JD3 LČG = 3. tavba, C = 0%

JD4 LČG = 4. tavba, C = 1%

Y1-4a: označuje Y1 = 12,5mm,
4a je bližší určení vzorku.

Y2-3a: označuje Y2 = 25 mm,
3a je bližší určení vzorku.

3.3.3 Mechanické hodnoty LKG s různým obsahem Si

Pro stanovení mechanických hodnot byly odlity zkušební tyče o průměru $d = 30$ mm a délce $l = 115$ mm. Tvrdost byla měřena přímo na opracovaných odlitcích destiček a to tvrdoměrem firmy Karl Zeiss. Zkušební parametry byly zvoleny takto: zkušební kulička o $D = 5$ mm, zatížena silou 7355 N po dobu cca 30 s. Naměřené hodnoty v nálitkové a zdravé části byly zprůměrovány a v tabulce č. 3 - 6 jsou již uvedeny tyto průměrné hodnoty.

Tabulka č. 3 – 6: Mechanické hodnoty LKG

Vzorky	tl. desky (mm)	Ø HB vtok desky	Ø HB zdravá část	Mechanické hodnoty ze zkušebních odlitých tyčí			
				R _m (Mpa)	R _{p0,2} (Mpa)	A (%)	E (GPa)
tavba V JS111 (2,71 % Si)	8	170	172	425	288	20,59	206,86
	10	171	172				
tavba 17 JS112 (3,85 % Si)	8	218	214	570	349	22,93	173,64
	10	212	211				
tavba 18 JS113 (3,53 % Si)	8	200	202	502	332	22,69	188,52
	10	197	199				
tavba 19 JS114 (3,89 % Si)	8	212	214	530	351	23,15	199,79
	10	210	208				
tavba 20 JS115 (3,70 % Si)	8	195	202	-	368	25,30	203,57
	10	192	207				
tavba 21 JS116 (3,48 % Si)	8	190	195	503	248	26,20	184,82
	10	189	195				

3.4 Hodnoty naměřené ultrazvukem

Ultrazvukové měření bylo prováděno na přenosném univerzálním přístroji DIO 562 se sondou 2MHZ.

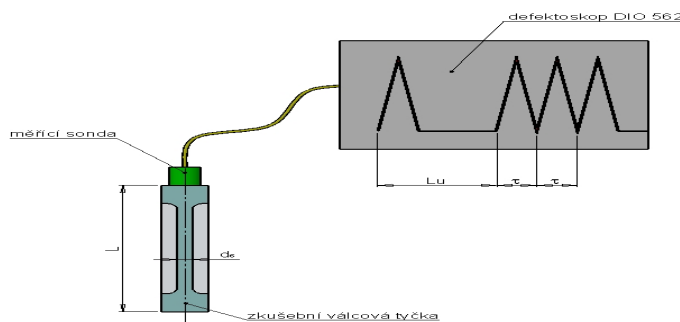


Obr. 3 – 1.: Přenosný univerzální defektoskop DIO 562 [18]

Tento přístroj slouží pro zjišťování defektu v materiálech, ke kontrole svarů klikových hřídelí a v neposlední řadě také k zjišťování modulu pružnosti na základě poměru mezi skutečnou tloušťkou stěny L a zdánlivou L_u . Je napájený ze sítě nebo pomocí výměnných akumulátorů. Pracuje v kmitočtovém rozsahu 0,5 – 20 MHz. Zesílení lze volit v rozmezí 20 – 100 dB po 0,1 dB. Rychlost šíření je stavitelná v rozmezí od 1000 – 10 000 m.s⁻¹. Aparát je vybaven dvěma vstupy. K měření byla použita pro LLG jednoměničová 2 MHz sonda firmy Starmans a pro LKG a LČG to byla sonda SEB2 . [18]

3.4.1 Rovnice pro výpočet E_0

Vlastní měření spočívá v prozařování vzorků a odečítání hodnot relativních délek tyčí (akustických drah) L_u a zpoždění vedlejšího echa neboli příčné podélné vlny τ z obrazovky přístroje (viz. obr. 3 – 2).



Obr. 3 – 2.: Princip měření ultrazvukem



Výpočet modulu pružnosti závisí na rychlosti zvuku c_L . Rychlost zvuku klesá, čím více grafitické útvary oslabují matici (čím jsou štíhlejší), tím větší je hodnota akustické dráhy L_u ve srovnání s přímou dráhou, tj. tloušťkou prozvučované stěny L .

$$c_L = c_{L0} * \frac{L}{L_u} = 5920 * \frac{L}{L_u} = c_{L0} * c_R \quad [\text{m/s}] \quad (14)$$

$c_{L0} = 5920 \text{ m/s}$ - rychlost zvuku ocelové matrice litiny,

$\frac{L}{L_u} = c_R$, kde c_R je relativní rychlost zvuku

Rychlost zvuku v litině záleží na labyrintu grafitických útvarů, které dále ovlivňují prostupnost a velikost akustické vlny maticí. Prostupnost akustických vln materiálem klesá s množstvím a velikostí vnitřních nespojitostí. Grafit odrazí 80,5 % tlaku akustické vlny. Přímé šíření akustické vlny litinou je po několika odrazech od grafitu vyčerpáno a rozptýleno. Hodnota rychlosti zvuku se zvyšuje s rostoucím množstvím ledeburitu ve struktuře. To je způsobeno vyloučením uhlíku ve formě tvrdého karbidu Fe_3C místo grafitu. Grafit totiž výrazně zvyšuje útlum.

Zpoždění příčné zvukové vlny se spočítá:

$$T = \tau * c_R, \quad [\text{m}] \quad (15)$$

kde τ je odečtené zpoždění příčné zvukové vlny.

Hodnota E závisí přímo na velikosti rychlosti zvuku c_L a tedy na množství a tvaru grafitu.

$$c_L = \sqrt{\frac{\frac{E}{\rho} * (1 - \mu)}{(1 + \mu) * (1 - 2 * \mu)}} \quad [\text{m/s}] \quad (16)$$

ρje měrný objem [kg/m^3]

Emodul pružnosti [Pa]

μPoissonovo číslo [-]

Poissonovo číslo se dá určit jako:

$$\mu = 0,5 - \frac{d^2}{8T^2}, \quad [-] \quad (17)$$

d je střední \varnothing vzorku tyče.



Nyní již lze dopočítat konstantu K. Konstanta je funkcí zpoždění příčné zvukové vlny τ a měrného objemu ρ :

$$K = c_0 * \sqrt{2 * \frac{m}{V} * \frac{1,5 - \frac{d^2}{8 * T^2}}{1 + \frac{4 * T^2}{d}}} \quad [N^{1/2}/m] \quad (18)$$

m..... hmotnost měřené tyče [g],

V..... objem vzorku vypočítaný ze změřené délky L a středního \varnothing d [m^3].

Tento vztah lze upravit:

$$K = c_0 * \sqrt{\rho * \frac{(1 + \mu) * (1 - 2\mu)}{1 - \mu}} \quad [N^{1/2}/m] \quad (19)$$

Úpravou vztahu (16) lze získat zjednodušený výraz, kde L je skutečná síla stěn a L_u síla stěn měřená ultrazvukem

$$E_0 = \left(K * \frac{L}{L_u} \right)^2 \quad [Pa] \quad (20).$$

3.4.2 Hodnoty naměřené ultrazvukem u LLG

Vzorky byly odebrány z Y-bloků jednotlivých taveb. Konstanty K pro výpočet modulu pružnosti byly získány měřením na válcových tyčích. Opět nebyly vyhodnoceny všechny vzorky, ale pro základní informaci to bude postačující. Kompletní tabulky s naměřenými a vypočítanými hodnotami jsou uvedeny v příloze.

Počáteční délka tyče (prozvučovaná tloušťka) L_0 byla změřena posuvným měřítkem a zapsána do tabulky stejně jako ultrazvukem změřená síla stěn L_u a zpoždění příčné zvukové vlny τ . Každá zkušební tyčka byla ještě zvážena na laboratorních vahách a hmotnost byla opět zaznamenána do tabulky.

Tímto způsobem byly zpracovány také další vzorky litin.

Tabulka s hodnotami LLG z ultrazvukového měření musela být rozdělena podle jednotlivých obsahů Cu, aby byla přehledná. Označení tyčí podává informaci o tom, jedná-li se o první nebo druhý vzorek tyče (1Y1A13), z jakého bloku byla vyrobena ta konkrétní tyčka (1Y1A13). Hodnota za písmenkem, které udává obsah Cu (1Y1A13), vyjadřuje \varnothing tyče (1Y1A13).



Tabulka č. 3 – 7: Ultrazvukové hodnoty LLG – obsah A = 0,02 % Cu

Vzorek	Tyč	d	L ₀	L _U	ρ	v _L tyč	μ	K	E ₀
		[mm]	[mm]	[mm]	[g/cm ³]	[m/s]	[1]	[1]	[GPa]
3479 A (LLG) (0%Cu)	1Y1 A13	13,4	204,2	276,3	7,244	4375,98	0,2433	462,76	117,01
	1Y1 A17	17,0	207,5	284,6	-				
	2Y1 A21	21,4	197,3	278,4	-				
	2Y1 A22	21,7	198,0	274,4	7,148	4272,50	0,2311	464,44	112,35
	1Y2 A15	15,3	206,7	286,6	7,147	4269,59	0,2397	461,12	110,60
	1Y2 A18	18,4	209,3	274,1	-				
	2Y2 A21	20,6	198,4	278,4	7,195	4218,85	0,2982	433,91	95,62
	2Y2 A22	22,1	197,7	259,6	7,258	4508,41	0,2785	446,84	115,80

Tabulka č. 3 – 8: Ultrazvukové hodnoty LLG – obsah B = 0,43 % Cu

Vzorek	Tyč	d	L ₀	L _U	ρ	v _L tyč	μ	K	E ₀
		[mm]	[mm]	[mm]	[g/cm ³]	[m/s]	[1]	[1]	[GPa]
3479 B (LLG) (0,43% Cu)	1Y1 B13	12,6	207,3	287,3	-				
	1Y1 B14	14,4	208,0	297,3	-				
	2Y1 B22	21,5	196,2	246,4	7,049	4713,90	0,2187	465,60	137,45
	2Y1 B22	22,2	197,7	249,5	7,145	4690,92	0,2522	455,86	130,48
	1Y2 B15	14,6	206,4	293,3	-				
	1Y2 B15	15,4	208,6	293,2	7,320	4211,84	0,2326	469,41	111,53
	2Y2 B19	18,5	194,5	242,9	7,207	4740,39	0,2394	463,17	137,55
	2Y2 B22	22,2	197,2	248,2	7,177	4703,56	0,2908	437,63	120,90



Tabulka č. 3 – 9: Ultrazvukové hodnoty LLG – obsah C = 0,74 % Cu

Vzorek	Tyč	d	L ₀	L _U	ρ	v _L tyč	μ	K	E ₀
		[mm]	[mm]	[mm]	[g/cm ³]	[m/s]	[1]	[1]	[GPa]
3494 C (LLG) (0,74% Cu)	1Y1 C17	16,6	208,3	276,7	7,325	5546,58	0,2938	440,38	109,90
	1Y1 C18	17,9	207,3	268,9	-				
	2Y1 C19	18,9	197,2	267,4	7,192	4366,32	0,2203	469,77	120,05
	2Y1 C22	22,1	197,0	245,4	7,265	4753,37	0,2702	451,29	131,30
	1Y2 C14	14,4	206,7	254,1	-				
	1Y2 C16	15,6	207,2	290,0	-				
	2Y2 C22	22,0	196,8	248,8	7,202	4682,70	0,2654	451,69	127,65
	2Y2 C22	22,2	197,3	254,6	7,156	4588,55	0,2675	449,22	121,24

Tabulka č. 3 – 10: Ultrazvukové hodnoty LLG – obsah D = 1,41 % Cu

Vzorek	Tyč	d	L ₀	L _U	ρ	v _L tyč	μ	K	E ₀
		[mm]	[mm]	[mm]	[g/cm ³]	[m/s]	[1]	[1]	[GPa]
3494 D (LLG) (1,41% Cu)	1Y1 D14	13,8	206,4	310,9	-				
	1Y1 D17	17,0	210,2	295,4	-				
	2Y1 D20	20,0	197,0	249,3	-				
	2Y1 D22	21,8	196,8	251,4	-				
	1Y2 D14	14,3	207,0	296,4	-				
	1Y2 D18	18,2	207,1	279,9	7,342	4380,25	0,2330	470,00	120,94
	2Y2 D22	21,5	195,3	246,6	-				
	2Y2 D22	22,2	196,0	250,1	-				



3.4.3 Hodnoty naměřené ultrazvukem u LKG a LČG

Měřením na válcových tyčích byly získány konstanty K pro výpočet modulu pružnosti a naměřené hodnoty jsou zpracovány v tabulce č. 3 – 11.

Modul pružnosti se vypočítal dle vzorce (20).

Tabulka č. 3 – 11: Ultrazvukové hodnoty LKG a LČG měřené na zkušebních válcových tyčích

Vzorek	Tyč	d	L ₀	L _u	ρ	v _L	μ	K	E ₀
		[mm]	[mm]	[mm]	[g/cm ³]	[m/s]	[1]	[1]	[GPa]
JD1 LKG (tavba 1)	A1	28,5	147,9	153,2	7,211	5714,08	0,3151	423,60	167,17
	A2	28,5	147,6	153,1	7,218	5707,26	0,2970	435,27	176,09
	A3	29,0	146,5	151,9	7,164	5709,48	0,2943	435,25	176,20
	A4	28,5	148,0	153,5	7,201	5707,88	0,2960	435,35	176,19
	A5	28,7	146,2	151,4	7,219	5714,72	0,2973	435,11	176,42
	A6	26,9	146,0	151,3	7,178	5712,62	0,2918	437,12	177,92
JD2 LKG (tavba 5)	A1	27,2	147,9	153,2	7,152	5713,26	0,2911	436,73	177,65
	A2	28,4	144,6	149,7	7,113	5715,19	0,2921	434,96	176,32
	A3	28,2	148,7	151,2	7,107	5824,04	0,3426	400,15	154,97
	A4	27,2	147,0	152,1	7,033	5718,43	0,2933	431,79	173,96
	A5	28,4	145,6	150,8	7,061	5712,76	0,2901	434,50	175,80
	A6	29,0	147,2	152,6	7,106	5710,51	0,2890	436,49	177,28
JD3 LČG (tavba 3)	A1	27,9	146,1	161,6	7,077	5352,18	0,2556	452,20	167,14
	A2	26,8	146,7	163,0	7,108	5328,00	0,2801	441,38	157,80
	A3	28,0	146,4	162,1	7,031	5346,63	0,2743	441,96	159,32
	A4	28,3	147,4	163,4	7,068	5340,32	0,2917	433,83	153,15
	A5	28,0	147,7	163,9	7,026	5333,56	0,2838	436,88	154,93
	A6	27,5	147,3	163,6	7,133	5331,80	0,2994	431,34	150,92
JD4 LČG (tavba 4)	A1	28,8	148,9	168,0	7,057	5246,95	0,2844	437,52	150,37
	A2	29,0	149,1	167,0	7,012	5285,46	0,2785	439,23	153,78
	A3	29,0	148,8	167,1	7,025	5271,67	0,2679	444,90	156,96
	A4	28,9	149,4	167,8	7,058	5270,85	0,2850	437,22	151,53
	A5	29,0	147,5	166,4	7,023	5247,60	0,2668	445,37	155,85
	A6	28,9	149,6	168,0	7,038	5271,62	0,2761	441,26	154,40



Tabulka č. 3 – 12: Ultrazvukem naměřené hodnoty na válcových polotovarech tyčí pro zkoušku tahem

Vzorek	Tyč	d	L ₀	L _U	v _L	E _{UL}
		[mm]	[mm]	[mm]	[m/s]	[GPa]
JD1 LKG (tavba 1) (1%Cu)	Y1-4a	12,00	86,14	89,20	5716,92	176,17
	Y1-4b	10,92	79,00	81,80	5717,36	168,39
	Y2-3a	15,92	89,93	93,50	5693,96	147,54
	Y2-3b	15,95	86,33	90,00	5678,60	162,30
JD2 LKG (tavba 5) (0%Cu)	Y1-1a	11,98	89,92	93,40	5699,43	174,84
	Y1-1b	10,98	90,10	93,60	5698,63	162,86
	Y2-3a	15,97	90,18	94,20	5667,36	164,76
	Y2-3b	15,96	89,90	93,90	5667,82	172,30
JD3 LČG (tavba 3) (0%Cu)	Y1-1a	11,97	87,64	97,60	5315,87	139,49
	Y1-1b	11,98	81,40	90,70	5312,99	154,66
	Y2-3a	15,95	89,95	100,50	5298,55	140,22
	Y2-3b	15,96	88,84	101,50	5181,60	149,37
JD4 LČG (tavba 4) (1%Cu)	Y1-2a	11,98	88,97	101,60	5184,08	143,04
	Y1-2b	11,99	90,10	102,30	5214,00	154,66
	Y2-1a	15,92	90,04	105,10	5071,71	148,70
	Y2-1b	16,00	90,10	104,60	5099,35	143,51

Vysvětlivky k označení:

Y1-1a.....Y1 označuje velikost Y-bloku

.....1a je původní označení, momentálně jen další rozlišující údaj

Tato tabulka č. 3 - 12. představuje informativní hodnoty naměřené ultrazvukem na zkušebních tyčích, připravených pro zkoušku tahem. V diskuzi bude hodnocena tabulka č. 3 – 11, která obsahuje více hodnot ultrazvukového měření. Jsou v ní hodnoty odlitých zkušebních tyčí.



3.4.4 Hodnoty naměřené ultrazvukem u LKG

Tabulka č. 3 – 13: Ultrazvukem naměřené a vypočítané hodnoty E_0 u LKG

Tyč	d	L_0	L_u	ρ	v_0	μ	K	E_0
	[mm]	[mm]	[mm]	[g/cm ³]	[m/s]	[1]	[1]	[GPa]
JS111 (V) (2,71)	16,31	218,5	244,8	7,0240	5284,0	0,27	445,79	158,47
JS112 (17) (3,85)	16,53	213,5	236,5	7,1200	5345,4	0,29	435,02	154,29
JS113 (18) (3,53)	16,70	214,5	238,3	7,0336	5329,4	0,26	451,52	165,23
JS114 (19) (3,89)	16,32	215,9	239,5	7,0669	5336,7	0,29	435,77	154,31
JS115 (20) (3,70)	17,03	215,4	240,0	7,0670	5313,2	0,28	442,58	157,78
JS116 (21) (3,48)	16,81	214,2	238,8	7,1680	5310,2	0,25	459,16	169,63

Vysvětlivky k označení:

JS111 – JS116 zjednodušené označení pro prvotní orientaci.

Hodnoty v 1. závorce označují původní označení taveb. Hodnoty v 2. závorce uvádějí obsahy Si pro přehlednější posuzování vlivu na E_0 .

První čtyři parametry byly naměřeny zbylé dopočítány. Zhodnocení vlivu Si na modul pružnosti bude proveden v diskuzi.



4. Diskuze

Z tabulek naměřených a vypočítaných hodnot byly zjištěny tyto skutečnosti.

a) Vliv Cu v LLG (GJL) na naměřené hodnoty modulu pružnosti.

Vzhledem k malému množství naměřených mechanických hodnot je těžké učinit nějaký závěr. Snad jen ten, že s rostoucím obsahem Cu roste i tvrdost litiny. Při porovnání tavby A (Cu = 0,02%) a tavby D (Cu=1,41%) byl zjištěn 15-ti procentní nárůst tvrdosti, což je cca 26 HB.

Stojí za to zmínit normu litiny s lupínkovým grafitem ČSN EN 1561, která uvádí modul pružnosti jako poměrně široký rozsah hodnot s komentářem, že hodnota E závisí na množství a tvaru grafitu a také na zatížení, což je v porovnání s bývalou českou normou, která uváděla vždy konkrétní hodnotu počátečního modulu pružnosti (tj. hodnota E_0 při téměř nulovém napětí) značně zavádějící informace. Bylo by dobré doplnit tuto převzatou normu o konkrétní parametry a konkrétní hodnoty modulu pružnosti. Toto upozornění lze chápat jako jedno z dalších témat diplomové práce.

U LLG se modul pružnosti měřený zkouškou tahem pohybuje v širším rozsahu z důvodu neplatnosti Hookova zákona

Také ultrazvuková metoda neobsahuje všechna data, ale už je zde přeci jen možnost pozorovat, že při nulovém obsahu Cu byla průměrná hodnota o 17 GPa nižší než hodnota vzorků B, tj. s obsahem mědi 0,43%. Při vyšší hodnotě Cu (vzorek C, tj. Cu=0,74%) však modul pružnosti již opět pozvolně klesal cca o 5 GPa. Bohužel, z poslední hodnoty obsahu Cu = 1,41% již nelze z jedné hodnoty dedukovat, že by modul pružnosti klesal dál. To může být dáno tím, že Cu zlepšuje vylučování grafitu a čím více se ho vyloučí, tím více bude klesat rychlost zvuku a modul pružnosti. Modul pružnosti v litinách obecně je ovlivňován tvarem, velikostí a množstvím vyloučeného grafitu. Ale nebylo prokázáno, že by nějakým zásadním způsobem obsah Cu ovlivňoval modul pružnosti v LLG.

b) Vliv Cu v LKG (GJS) a LČG (GJV) na naměřené hodnoty modulu pružnosti

Nejdříve bude hodnocen vliv množství Cu na LKG, pak na LČG a nakonec budou porovnány obě litiny se stejným obsahem Cu a to všechno jak z hlediska mechanických zkoušek, tak ultrazvukových.



V litině s kuličkovým grafitem s obsahem Cu 1% byl zkouškou tahem zjištěn modul pružnosti o 8,67 GPa větší než u obsahu 0%. V litině s červíkovým grafitem je to naopak. Tam má vyšší modul pružnosti litina s 0% Cu, cca o 22 MPa. S velkou pravděpodobností jde opět o schopnost Cu v zlepšování vylučování grafitu. Při porovnání modulu pružnosti mezi litinami s kuličkovým a červíkovým grafitem, ať o obsahu 1% nebo 0% Cu, se tato teze jenom potvrzuje, protože LKG má obecně větší modul pružnosti než LČG, což se naměřenými hodnotami prokázalo. Z tohoto zjištění také plyne, že zásadní vliv bude mít morfologie grafitu, ale to není cílem této práce. Zajímavé je, že hodnoty obou litin při obsahu 0% Cu mají rozdíl modulu pružnosti kolem 30 GPa, který se s růstem obsahu Cu na 1% zvětšuje až na dvojnásobek, tj. 60 GPa.

Mechanické hodnoty měření modulu pružnosti mají širší rozsah naměřených hodnot než při měření ultrazvukem. Při měření ultrazvukem vychází hodnoty LKG při 0% Cu 173 GPa a při 1 % Cu 175 GPa tj., velmi podobně, kdežto u mechanicky naměřených hodnot byly výsledky vyšší (0% Cu = 182,5 GPa a 1% Cu = cca 191 GPa). To je zřejmě dáno tím, že modul pružnosti je v grafu tahové zkoušky směrnicí přímky ($\tan \alpha$) a odečítá se z grafu, což je velice individuální a výsledky jsou zatíženy chybou měření. Tyto hodnoty, které byly zjištěny při měření ultrazvukem se ukazují jako velice přesné a odpovídají hodnotám modulů pružnosti uvedeným v normě ČSN EN 1563. Měření ultrazvukem potvrzuje u LČG, že hodnoty naměřené ultrazvukem si jsou opět velmi podobné. Rozdíl naměřených hodnot při 1% Cu a 0% Cu je však cca 3,5 GPa ve prospěch nulového obsahu Cu. Zde se mechanické hodnoty a hodnoty ultrazvuku při obsahu 0% Cu celkem shodují. Ultrazvukem naměřené hodnoty jsou o 4,5 GPa větší než ze zkoušky tahem.

c) Vliv Si v LKG (GJS) na naměřené hodnoty modulu pružnosti

V poslední sadě vzorků označených JS111 – JS116 je vhodné porovnat tavby V (JS111) a 17 (JS112), protože mají stejný obsah uhlíku, ale rozdílný obsah Si. S rostoucím obsahem Si klesá modul pružnosti. Vyjádřeno číselně pro tento případ – přibude-li 1% Si poklesne modul pružnosti asi o 4 GPa. To však bylo spočítáno u ultrazvukové metody. V obou případech zkoušení platí, že zvýšení obsahu Si způsobí pokles modulu pružnosti. Hodnoty naměřené



mechanicky jsou větší v řádu o desítky. Nejmenší rozdíl naměřených hodnot je 14 GPa (u tavby 21) a největší rozdíl je 48 GPa (u tavby V). Při porovnání taveb 19 (JS114), 20 (JS115) a 21 (JS 116) lze zjistit, že při rostoucím obsahu Si a C (asi po 0,2 %C) také platí, dle ultrazvukové zkoušky, že modul pružnosti poklesne. Tyto ultrazvukové hodnoty se neshodují s těmi mechanickými.

Všechny závislosti jsou ovlivněny malým počtem vzorků, ale monitorují nejznámější druhy litin v souvislosti s modulem pružnosti a množstvím legujících prvků - Cu a Si jejich ovlivňujících.

Pro směrodatné číselné hodnoty by musel být vytvořen velký soubor vzorků litin s velmi podobným složením (hlavně obsah C), aby se omezil vliv dalších prvků, a pak lze vše řádně statisticky vyhodnotit a udělat jednoznačný závěr. To je však finančně a časově velmi náročné.

Závěrečné hodnocení, i přes malý počet vzorků zní, že hodnoty modulu pružnosti nejsou nijak významně ovlivňovány obsahy křemíku a mědi.

5. Závěr

Vliv legujících prvků na mechanické a fyzikální vlastnosti litin a ocelí je zásadní. Legující prvky dokáží ovlivnit veškeré vlastnosti, strukturu i hodnoty mechanických vlastností litin a ocelí.

Litiny ovlivňuje hlavně C a Si a další prvky, o kterých je psáno v rešeršní části práce.

V této diplomové práci bylo určeno zaměřit se na měď a křemík a na jejich vliv na hodnotu modulu pružnosti v litinách s lupínkovým a kuličkovým grafitem. A protože litina s červíkovým (vermikulárním) grafitem je přechodem mezi těmito dvěma litinami a byla ve vzorkách, které byly k dispozici, byla zahrnuta do hodnocení také.

Hodnoty byly měřeny velmi často používanými metodami. Jednou nedestruktivní metodou – ultrazvukem a jednou destruktivní – zkouškou tahem.

Ultrazvuková defektoskopie je vysoce produktivní a poměrně přesná metoda měření mechanických vlastností litinových odlitků. Měřením hodnot E_0 bylo zjištěno, že jsou shodné s hodnotami normovanými dle ČSN EN 1563 (LKG).



Tahová zkouška jako základní zkouška podává prvotní důležité informace o vlastnostech a parametrech materiálu, ale již neurčuje tak přesně hodnoty modulu pružnosti.

Další metoda, která byla uvedena v zadání a je o ní pojednáno v teoretické části – metoda vířivými proudy – nemohla být z důvodu vysokých finančních nároků uskutečněna (TUL nevlastní přístroj) a bude pravděpodobně námětem další práce.

Veškerá měření byla zapsána do tabulek a uvedena v praktické části, vyhodnocení bylo provedeno v diskuzi.

Na základě počtu měření a vzorků nelze dělat jednoznačné závěry, ale i přesto lze říci, že modul pružnosti je jen minimálně ovlivňován legurami Si či Cu.



6. Seznam použité literatury

- [1] Vojtěch, D.: Kovové materiály. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha 2006. Str. 120. ISBN 80-7080-600-1, str.111 – 113 a 120 – 124
Dostupné z : http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_isbn-80-7080-600-1/pages-img/
- [2] Studijní opora: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálových věd a inženýrství dostupné z: <http://tomsland.com/vut/>
- [3] Ryš, P., Čeněk, M., Mazanec, K., Hrbek, A.: Nauka o materiálu I4 – A. Academia, Praha 1975
- [4] Fremunt, P., Podrábský, T.: Konstrukční oceli, CERM, Brno 1996.
- [5] Pluhař, J. a kol.: Nauka o materiálech. SNTL, Praha 1989
- [6] Technické slitiny železa. Internetové stránky:
http://mujweb.cz/www/hvladimir/02/02_technicke_slitiny_zeleza.html
- [7] Internetové stránky o mechanickém zkoušení:
http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_mechanicke_zkoušení/index.htm,
- [8] Posouzení stanovení šedé litiny ze zkoušky mezi klíny - internetové stránky: http://www.sczl.cz/dokumenty/k06_01.pdf
- [9] Zkoušení mechanických vlastností – internetové stránky:
http://mujweb.atlas.cz/www/pk80/pub/st/data/st1/zk3_1.htm
- [10] Zkoušení mechanických vlastností – internetové stránky:
http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_mechanicke_zkoušení/index.htm
- [11] Ptáček, L. a kolektiv: Nauka o materiálu I., CERM, Brno 2003, ISBN 80-7204-283-1, str. 482 - 502
- [12] Obraz, J.: Zkoušení materiálu ultrazvukem. Nakladatelství technické literatury Praha 1989, ISBN 80-03-00097-1, str. 17 – 26, 84 – 86, 104 - 105
- [13] Vířivoproudé zkoušení – internetové stránky:
<http://www.foerster.cz/main.php?pageid=4000>
- [14] Šroub, J.: Metoda vířivých proudů. Semestrální práce. Západočeská univerzita v Plzni. Stránka dostupná z internetu:
<http://www.cdm.cas.cz/czech/hora/vyuka/tdk/sem2004/ECSROUB.doc>
- [15] Ultrazvukové metody dostupné na internetu:
<http://www.olympusndt.com/cs/applications-and-solutions/introductory-ultrasonics/introduction-material-analysis/>
- [16] Dočekal, J., Skrbek, B.: Non-destructive measurement of hardness on uneven surfaces of castings. Faculty of mechanical engineering, Liberec: Department of Material Science, 44th Foundry Days



- [17] Dočekal, J., Skrbek, B., Tomáš, I.: Mapování mechanických vlastností litinových taveb prostředky nedestruktivní strukturoskopie. Polish Academy of Sciences vol.8, Issue 2, Archives of foundry Engineering, April - June 2008, str. 152 - 161
- [18] Ruční defektoskopy - manuály: http://www.starmans.net/dio_562.htm